Ⅲ

변압기

1. 변압기의 구조와 원리
2. 변압기의 정격, 손실과 효율
3. 변압기의 특성
4. 변압기의 병렬 운전과 결선
5. 변압기의 점검과 시험



6. 특수 변압기
7. 단상 변압기의 권선과 조립









변압기는 패러데이(Faraday)가 전자 유도 법칙을 발견한 후, 이것을 기초로 하여 1882년경에 영국인 기브스(Gibbs)에 의하여 철심의 둘레에 권선(winding)을 한 실용적인 변압기가 만들어졌다. 변압기는 일정한 크기의 교류 전압을 다른 크기의 교류 전압으로 변화시켜 수용가에 필요한 전압을 효율적으로 공급하여 주는 정지형 전기 기기이다.

이 단원에서는 변압기의 구조, 원리, 특성, 결선, 운전과 취급에 대하여 알아본다. 그리고 단권 변압기, 계기용 변성기와 같은 특수 변압기에 대하여도 알아본다.



변압기의 구조와 원리

학습 목표 |

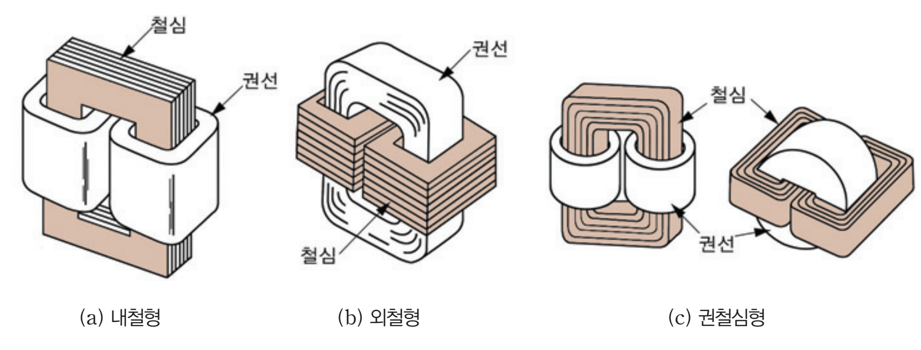
1. 변압기의 구조와 형식에 대하여 설명할 수 있다.
2. 변압기의 원리를 설명할 수 있다.
3. 변압기의 전압과 전류의 관계를 설명할 수 있다.
4. 변압기의 등가 회로, 백터도를 설명할 수 있다.

1 변압기의 구조와 형식

변압기(transformer)는 전기 회로를 구성하는 권선, 자기 회로를 구성하는 철심으로 구성되어 있다. 변압기 용량이 커지면, 권선과 철심을 수납하는 외함, 인출선과 외함을 절연시키는 부싱(bushing), 절연유와 냉각 장치가 필요하게 된다.

또, 변압기는 철심과 권선의 위치에 따라 그림 Ⅲ-1과 같이 내철형(core type), 외철형(shell type), 권철심형(wound core type)으로 나뉜다.

내철형은 그림 Ⅲ-1의 (a)와 같이 철심이 안쪽에 있고, 권선은 철심각에 감겨져 있으며, 철심은 철심각(leg)과 그것을 연결하는 계철(yoke)로 구성되어 있다. 내철형은 구조상 절연이 쉬워 고전압 대용량에 적합하다. 외철형은 그림 Ⅲ-1의 (b)와 같이 권선이 안쪽에 감겨져 있고 철심이 권선을 둘러싸고 있으며, 저전압 대전류에 적합하다. 권철심형은 단책형의 철판을 포개어 철심을 조립하는 종래의 방식과는 달리, 냉간 압연 규소 강대를 그림 Ⅲ-1의 (c)와 같이 맴돌이 모양으로 감아서 만들며, 주로 소형의 배전용 변압기에 쓰인다.



(a) 내철형 (b) 외철형 (c) 권철심형

그림 Ⅲ-1 변압기의 형식

1. 철심

철심 중에는 교번 자기력선속에 의한 철손이 발생하지만 이것을 적게 하기 위하여 일반적으로 규소 함유량이 3.5[%], 두께 0.35[mm]인 규소 강판을 여러 장 포개서 성층한 철심을 사용하고 있다. 얇은 철판을 성층하여 철심을 만드는 까닭은 맴돌이 전류에 의한 철손을 적게 하기 위한 것이고, 맴돌이 전류를 더욱 적게 하기 위하여 규소 강판에 절연 피막을 입혀 사용한다.

내철형 철심은 그림 Ⅲ－2의 (a)와 같이 단락형의 규소 강판을 연결 고리가 한쪽에만 모이지 않게 중첩하여 쌓는다. 용량이 커지면 그림 Ⅲ－2의 (b)와 같이 서로 다른 크기의 규소 강판을 조립하여 사용한 철심을 사용하기도 한다. 철심 내부의 열을 발산하기 위하여 변압기를 기름에 넣는 경우가 있는데, 이때 규소 강판 사이에 냉각용 기름이 잘 이동할 수 있게 기름 통로를 만든 것도 있다.

철심은 절연 볼트를 사용하여 고정시킨다. 볼트에 의하여 고정된 부분은 변압기의 단면을 감소시키기 때문에, 규소 강판을 접착제로 고정하여 절연 볼트 수를 감소시키고 있다. 특히, 권철심형 변압기는 특성이 좋은 방향성 규소 강대를 사용하기 때문에 철손이 적으며 여자 전류가 적게 흐르고, 철심의 단면적이 작고 무게가 가벼워서 주상 변압기와 같은 소형 변압기에 많이 사용되고 있다.

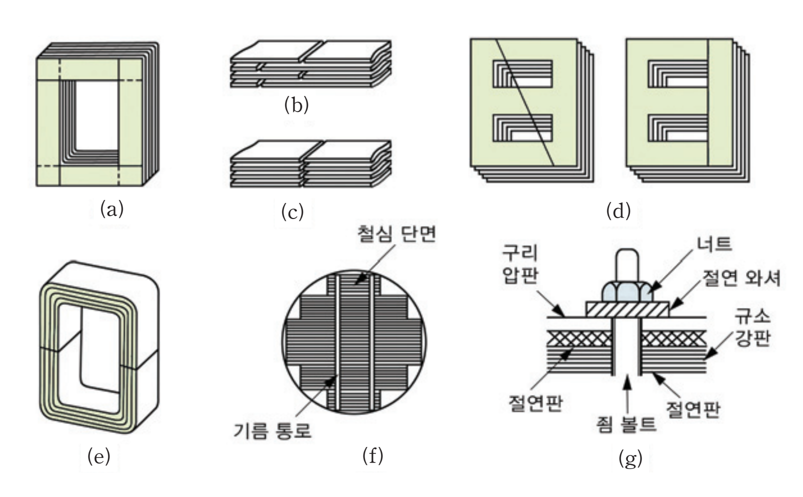


그림 Ⅲ－2 철심의 조립 방법

2. 권선

변압기의 권선에 사용되는 도체는 소용량인 경우에 에나멜을 피복한 구리 선이나 무명실을 이중으로 피복한 둥근 구리 선이 사용된다. 대용량인 경우에는 종이 테이프

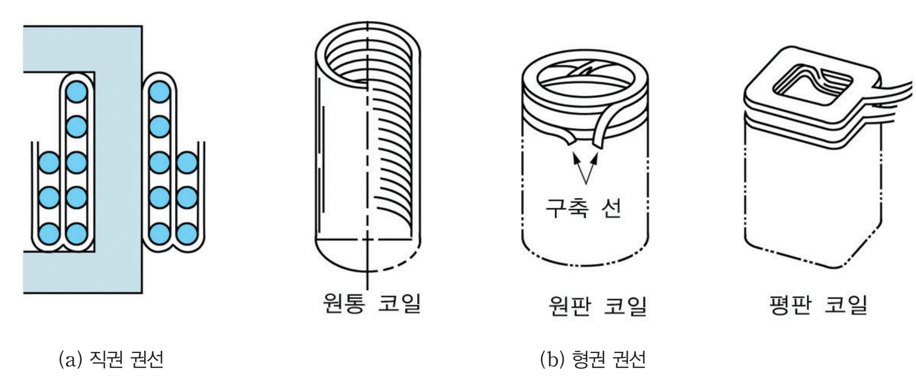


그림 Ⅲ－3 변압기 권선

로 절연한 직사각형의 평각 구리 선이 사용된다.

권선을 감는 방법에는 그림 Ⅲ－3과 같이 직권(direct wound)과 형권(form wound)의 두 종류가 있다.

직권은 그림 Ⅲ－3의 (a)와 같이 철심에 저압 권선을 감고 저압 권선의 표면에 전압에 견딜 수 있는 절연을 한 후에 고압권선을 감는 방식이다. 직권은 변압기 용량이 커질수록 절연을 하기 어려워 소형의 내철형에 주로 사용된다.

형권은 그림 Ⅲ－3의 (b)와 같이 목재 권선 형틀 또는 절연 통에 권선을 감고 절연한 후에 조립하는 방식이다. 철심과 권선 작업을 동시에 할 수 있어 제작 공정이 단축되고, 고장이 났을 때에 수리가 용이하며, 중형과 대형 변압기에 사용된다.

형권은 권선 모양에 따라 원통 코일, 원판 코일, 평판 코일로 구분되며, 원통 코일은 권선 제작이 용이하여 외철형의 소형 변압기에 사용된다. 원판, 평판 코일은 전류 용량이 큰 외철형의 대용량 변압기에 주로 사용된다.

3. 외함과 부싱

변압기의 본체와 절연유를 넣은 외함은 주철이나 강판을 용접하여 만들며, 용량이 커지면 냉각 면적을 넓히기 위하여 주름 모양의 철판을 사용하거나 방열판 또는 방열기를 설치한다. 외함의 표면에는 변압기의 용량과 결선도를 표시한 명판과 취급자의 안전을 위한 접지용 단자도 부착한다.

변압기 권선의 인출선을 끌어내는 절연 단자를 부싱(bushing)이라고 한다. 변압기의 외함과 철심은 대지와 접지되어 영전위이므로, 부싱은 변압기의 사용 전압에 견딜 수 있게 충분히 절연되어야 한다. 변압기의 부싱은 인출선과 외함 사이에 누설 전류가 생기지 않게 충분한 연면 거리를 두고 있어야 한다.

2 변압기의 원리

변압기는 자기 유도와 상호 유도 현상을 응용하여, 전원 쪽에 인가되는 전압, 전류의 관계를 권수에 비례하여 임의로 변환하는 전기 기기이다. 그림 Ⅲ－4와 같이 전원 쪽 권선에 의하여 발생된 자기력선속은 철심을 통하여 부하 쪽 권선을 지나면서 전자 유도 작용에 의해 부하 쪽 권선의 감은 횟수에 비례하는 유도 기전력을 발생시킨다. 이때 전원 쪽에 접속되어 있는 권선을 1차 권선(primary winding)이라고 하여, 부하 쪽에 접속되어 있는 권선을 2차 권선(secondary winding)이라고 한다.

1차 권선에서 발생된 자기력선속이 모두 2차 권선을 통과하고, 권선의 저항이 없다고 하면 이론적인 계산이 간단해지는데, 이와 같은 변압기를 이상 변압기(ideal transformer)라고 한다.

그림 Ⅲ－4와 같이 1차 권선 P와 2차 권선 S의 권수를 각각 N_1, N_2라고 하고, 1차 권선 P에 사인파 교류 전압 V_1[V]를 가할 때에 1차와 2차 권선에 유도되는 유도 기전력 즉, 역기전력 e_1, e_2[V]를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$e_1 = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}[\mathrm{V}],\ e_2 = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}[\mathrm{V}] \qquad (Ⅲ－1)$$

1차 권선 P에 주파수 f[Hz]의 사인파 교류 전압을 인가하면 $\frac{1}{f}$[초]의 주기를 가지는 사인파 자기력선속이 발생한다. 자기력선속은 반주기 동안 부의 최댓값 $-\Phi_m$[Wb]부터 양의 최댓값 $+\Phi_m$[Wb]까지 변한다. 이때, 유도 기전력 e_1, e_2의 실효값 E_1, E_2는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi_m \omega N_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \qquad (Ⅲ－2)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi_m \omega N_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \qquad (Ⅲ－3)$$

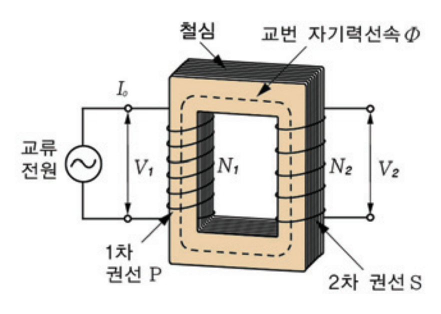


그림 Ⅲ－4 변압기의 원리

1. 권수비

식 Ⅲ-2 와 식 Ⅲ-3으로부터 E_1과 E_2의 비는 다음과 같다.

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m}=\frac{N_1}{N_2}=a \tag{Ⅲ-4}$$

위의 식을 보면, 변압기의 1차 권선과 2차 권선에 유도되는 기전력의 크기는 그 권수에 따라 비례함을 알 수 있다. 이때, $\frac{N_1}{N_2}$를 a라고 표시하며, 권수비(turn ratio)라고 한다.

또, 부하가 연결되어 있지 않고, 권선에 의한 전압 강하를 무시하면 단자 전압 V_1과 V_2는 유도 기전력 E_1, E_2와 거의 같게 되어 식 Ⅲ-4는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a=\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2}\cong\frac{V_1}{V_2} \tag{Ⅲ-5}$$

여기서, $\frac{V_1}{V_2}$를 변압비(voltage transformation ratio)라고 한다. 변압기는 권수비에 따라 1차 전압보다 높은 2차 전압을 얻을 수도 있고($N_1>N_2$인 경우), 1차 전압보다 낮은 2차 전압을 얻을 수도 있다($N_1<N_2$인 경우).

예제 1 1차 전압 6600[V], 2차 전압 220[V], 주파수 60[Hz]의 변압기가 있다. 이 변압기의 최대 자기력선속을 구하여라. 단, 1차 권선 수는 1200[회]이다.

풀이 |

권수비 $a=\frac{N_1}{N_2}=\frac{E_1}{E_2}=\frac{6600[V]}{220[V]}=30$

최대 자기력선속 $\Phi_m=\frac{E_1}{4.44fN_1}=\frac{6600[V]}{4.44\times60\times1200}=0.02[Wb]$

---

2. 변류비

변압기에 부하를 연결하면 부하에 전달되는 피상 전력 V_2I_2는 손실을 무시하면 1차 쪽에 공급된 피상 전력 V_1I_1과 같다. 따라서, 전원으로부터 변압기에 입력되는 전력과 부하에 공급되는 전력과의 관계는 $V_1I_1=V_2I_2$이 된다. 이 식에서 변압기 1, 2차 전류의 비는

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{V_2}{V_1}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{a} \tag{Ⅲ-6}$$

로 되고, 여기서 $\frac{I_1}{I_2}$를 변류비(current transformation ratio)라고 하며, 권수비의 역수 형태가 된다.

3 누설 자기력선속과 저항의 영향

이상 변압기의 경우에 1차와 2차 측에서 발생한 자기력선속이 모두 1차와 2차 권선을 통과하는 것으로 가정하였으나, 실제 변압기에서는 그림 Ⅲ－5와 같이 공기 중으로 누설되는 자기력선속이 존재한다.

1차와 2차 권선에 공통으로 통과하는 주자기력선속 Φ와 권선의 일부만 통과하는 누설 자기력선속 Φ_{l1}, Φ_{l2}가 각각 존재한다.

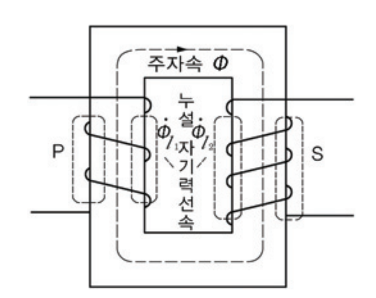


그림 Ⅲ－5 누설 자기력선속

주자기력선속에 의하여 기전력이 발생되는 것과 같이 누설 자기력선속에 의하여도 권선에 기전력이 발생되지만, 1차 누설 자기력선속 Φ_{l1}은 1차 권선에만 기전력을 발생시키며, 2차 누설 자기력선속 Φ_{l2}은 2차 권선에만 기전력을 발생시킨다. 실제 변압기는 누설 자기력선속에 의한 영향뿐만 아니라 권선이 가지는 권선 저항에 의한 영향을 모두 고려하여야 한다.

그림 Ⅲ－6과 같이 실제 변압기는 이상적인 변압기의 1차와 2차측에 각각 $\dot{Z}_1$, $\dot{Z}_2$이라는 임피던스가 직렬 접속된 것으로 나타낼 수 있다. $\dot{Z}_1$, $\dot{Z}_2$를 각각 1차 임피던스, 2차 임피던스라 한다. 즉, 이상 변압기의 1차 권선 P에는 1차 단자 전압 $\dot{V}_1$보다 $\dot{Z}_1$에 의한 전압 강하 $\dot{Z}_1\dot{I}_1$만큼 감소된 전압 $\dot{V}_1'$가 인가된다.

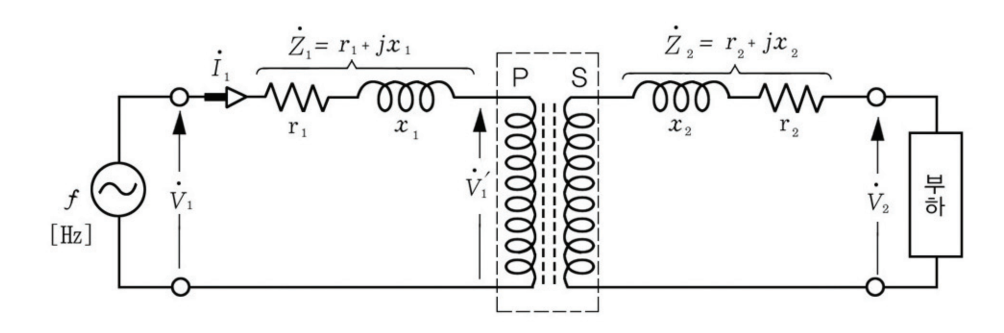


그림 Ⅲ－6 실제 변압기 회로

4 여자 전류

변압기의 1차 권선에 정현파 교류 전압 v_1'을 가하면 여자 전류 i_0가 흐르고, 철심 내에는 정현파 자기력선속 ϕ가 생긴다. 그러나 실제 변압기에서는 변압기 철심에 히스테리시스 현상에 의한 자기 포화 때문에 1차 권선에 공급된 전원이 정현파라도 1차 권선에 흐르는 여자 전류 i_0는 그림 Ⅲ-7과 같은 비정현파 전류 i_0'가 된다.

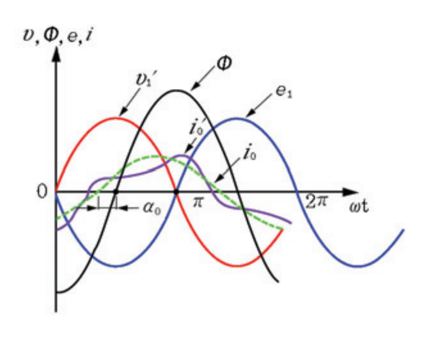


그림 Ⅲ-7 여자 전류 파형

변압기 철심에는 히스테리시스 현상에 따른 손실이 생기며, 또 자기력선속 변화로 인한 맴돌이 전류 때문에 손실이 발생한다. 이 두 가지 손실을 각각 히스테리시스손(hysteresis loss)과 맴돌이 전류손(eddy current loss)이라고 하며, 두 손실을 합쳐서 철손(iron loss)이라고 한다.

이상 변압기에서 1차 쪽의 단자 전압을 $\dot{V}_1'$[V]라고 하면, $\dot{V}_1' = -\dot{E}_1$이 되고, $\dot{I}_0$는 $\dot{V}_1'$보다 $\frac{\pi}{2}$[rad]만큼 위상이 뒤진다고 생각하였으나, 그림 Ⅲ-7과 같이 실제 변압기에서는 히스테리시스손과 맴돌이 전류손의 합인 철손 때문에 $\dot{I}_0$는 $\dot{\Phi}$보다 α_0만큼 위상이 앞서 있고, $\dot{V}_1'$보다는 $\theta_0 = \frac{\pi}{2} - \alpha_0$[rad]만큼 위상이 뒤진다.

이것은 철손으로 인하여 여자 전류의 위상이 앞서기 때문이다. 그림 Ⅲ-8에서 $\dot{I}_0$는

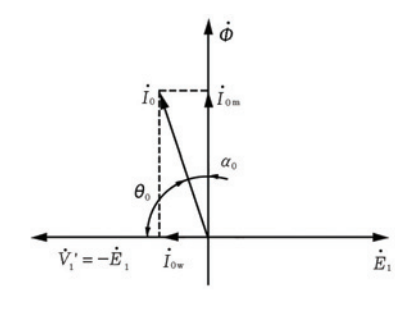


그림 Ⅲ-8 여자 전류 벡터도

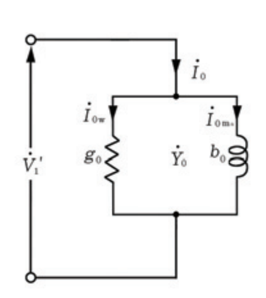


그림 Ⅲ-9 등가 여자 전류

$\dot{I}_{0w}$[A]와 $\dot{I}_{0m}$[A]의 두 성분으로 분리하여 생각할 수 있으며, $\dot{I}_{0w}$는 $\dot{V}_1{}'$와 동상으로 철손을 공급하는 철손 전류(iron loss current)라고 하며, $\dot{I}_{0m}$은 $\dot{\Phi}$와 동상으로 자기력선속을 유지시키는 자화 전류(magnetizing current)라고 한다.

변압기의 1차 권선에 여자 전류 $\dot{I}_0$만이 흐른다고 하면 1차 권선에는 $\dot{I}_{0w}$와 $\dot{I}_{0m}$의 두 전류가 나뉘어 흐르고, 그림 Ⅲ－9와 같은 등가 회로로 나타낼 수 있는데, 이와 같은 등가 회로를 여자 회로(exciting circuit)라고 한다.

또, 이 여자 회로에서 $\dot{Y}_0$을 여자 어드미턴스(exciting admittance), g_0를 여자 컨덕턴스(exciting conductance), b_0을 여자 서셉턴스(exciting susceptance)라고 하고 다음과 같이 나타낸다.

$$\left.\begin{aligned} &\cos\theta=\frac{I_{0w}}{I_0}=\frac{\text{철손}}{\dot{V}_0{}'\dot{I}_0} && \dot{Y}_0{}'=g_0-jb_0=\frac{\dot{I}_0}{\dot{V}_1{}'}[\mho] \\ &g_0=\frac{\dot{I}_{0w}}{\dot{V}_1{}'}=\frac{\text{철손}}{(\dot{V}_1{}')^2}[\mho] && b_0=\frac{\dot{I}_{0m}}{\dot{V}_1{}'}=\frac{\text{무효 전력}}{(\dot{V}_1{}')^2}[\mho] \end{aligned}\right\} \qquad (\text{Ⅲ}-7)$$

5 변압기의 벡터도

그림 Ⅲ－10은 실제 변압기 회로를 이상 변압기와 결합하여 나타낸 것이다.

이 회로에서 1차 임피던스 $\dot{Z}_1=r_1+jx_1$[Ω], 2차 임피던스 $\dot{Z}_2=r_2+jx_2$[Ω], 부하 임피던스 $\dot{Z}_L=r_L+jx_L$[Ω], 여자 어드미턴스 $\dot{Y}_0=g_0-jb_0$[℧]라고 하면 전압과 전류식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\left.\begin{aligned} &\dot{V}_1=\dot{V}_1{}'+(r_1+jx_1)\dot{I}_1=-\dot{E}_1+(r_1+jx_1)I_1 \\ &\dot{V}_2=E_2-(r_2+jx_2)\dot{I}_2=\dot{I}_2\dot{Z}_L \\ &\dot{I}_1=\dot{I}_0+\dot{I}_1{}' \end{aligned}\right\} \qquad (\text{Ⅲ}-8)$$

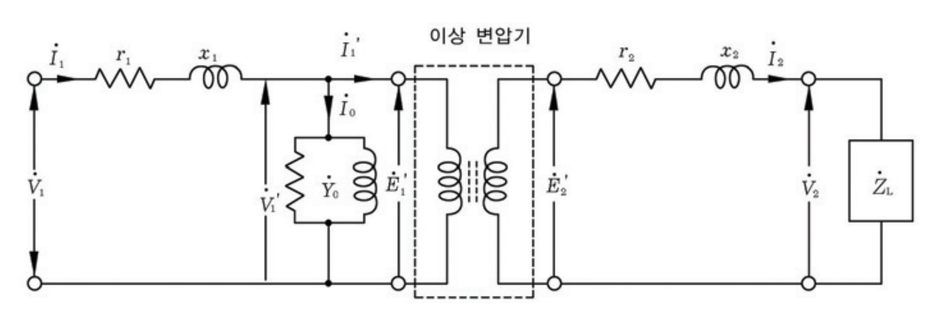


그림 Ⅲ－10 실제 변압기 회로

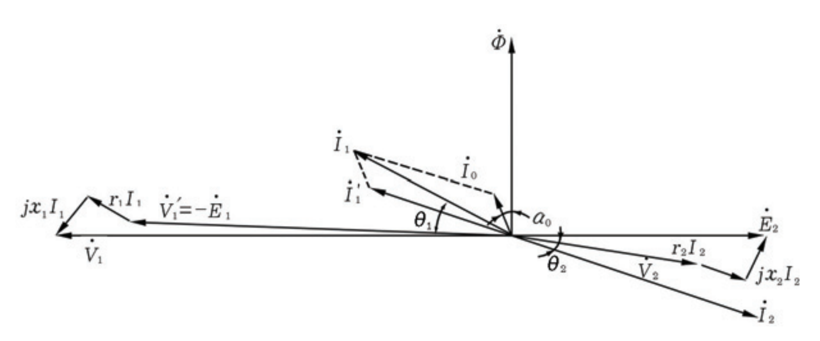


그림 Ⅲ-11 실제 변압기의 벡터도

이 식들을 이용하여 벡터도를 그리면 그림 Ⅲ-11과 같다. 여기서 $(r_1+jx_1)\dot{I}_1$은 1차 임피던스 강하라고 하고, $(r_2+jx_2)\dot{I}_2$는 2차 임피던스 강하라고 한다. 그림에 나타난 θ_1, θ_2는 각각 1차 쪽과 2차 쪽에서의 단자 전압과 전류 사이의 위상각을 나타내며, 부하 역률을 $\cos\theta_2$로 나타낸다. 그리고 부하 역률각 θ_2는 다음 식으로 구한다.

$$\theta_2=\tan^{-1}\frac{x_L}{r_L} \qquad (Ⅲ-9)$$

6 변압기의 등가 회로

변압기의 실제 회로는 1차 쪽의 회로와 2차 쪽의 회로가 서로 분리된 두 개의 회로로 구성되어 있지만, 전자 유도 작용에 의하여 1차 쪽의 전력이 2차 쪽으로 전달되므로 2개의 서로 독립된 회로로 생각하는 것보다 하나의 전기 회로로 변환시키면 회로가 간단해지며 특성 계산을 쉽게 할 수 있다. 이와 같이, 두 개의 독립된 회로를 하나의 전기 회로로 변환시킨 것을 등가 회로(equivalent circuit)라고 한다.

1. 1차 쪽에서 본 등가 회로

그림 Ⅲ-12는 1차 쪽으로 환산한 등가 회로이다. 이 등가 회로를 만들려면 2차 쪽의 전압, 전류, 임피던스를 1차 쪽으로 환산하여야 하고 다음과 같이 구한다.

$$\dot{I}_1'=\frac{\dot{I}_2}{a} \qquad \dot{I}_2=\frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_2+\dot{Z}_L}[\mathrm{A}] \qquad (Ⅲ-10)$$

또한, $\dot{V}_1'=-\dot{E}_1=-a\dot{E}_2=-aI_2(\dot{Z}_2+\dot{Z}_L)$이 되어

$$\frac{\dot{V}_1'}{\dot{I}_1'}=-a^2(\dot{Z}_2+\dot{Z}_L)[\Omega] \qquad (Ⅲ-11)$$

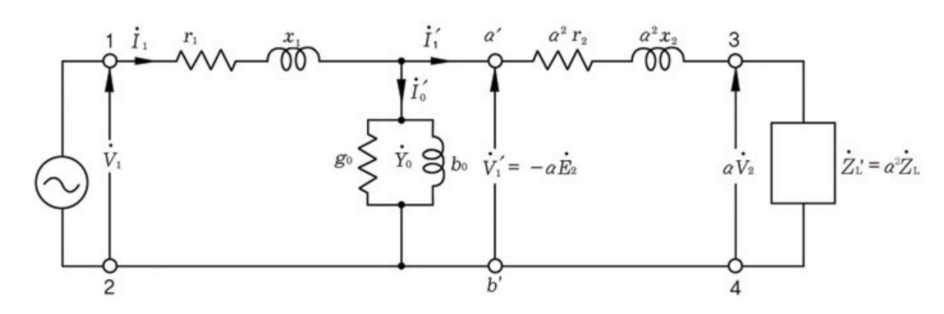


그림 Ⅲ－12 변압기의 등가 회로(1차 쪽으로 환산)

이 식에 의하여, 2차 쪽의 임피던스 $\dot{Z}_2$와 $\dot{Z}_L$을 a^2배하여 1차 쪽에 접속하여도 무방하다고 생각할 수 있으며, a^2를 변압기의 환산 계수(reduction factor)라고 한다. 이 경우에 1차 쪽의 전압, 전류, 임피던스, 어드미턴스는 그대로 두고, 2차 쪽의 전압을 $\frac{1}{a}$배, 전류를 a^2배, 임피던스는 a^2배로 한다.

2차 회로를 1차 회로로 환산한 값은 다음과 같이 된다.

$r_2' = r_{12} = a^2 r_2$ $\quad\quad$ $\dot{Z}_L' = \dot{Z}_{12} = a^2\dot{Z}_L$

$x_2' = x_{12} = a^2 x_2$

$R' = a^2 R$ $\quad\quad$ $X' = a^2 X$ $\quad\quad$ $\dot{I}_1' = \frac{1}{a}\dot{I}_2$

$\dot{V}_1' = a\dot{E}_2,\ \dot{V}_1 = a\dot{V}_2$

2. 2차 쪽에서 본 등가 회로

그림 Ⅲ－13은 2차 쪽에서 본 등가 회로이다. 이 등가 회로는 1차 쪽을 2차 쪽으로 환산하여 만들어지며 2차 쪽 전압, 전류, 임피던스는 그대로 두고 1차 쪽의 전압을 $\frac{1}{a}$배, 전류를 a배, 임피던스를 $\frac{1}{a^2}$배, 어드미턴스는 a^2배로 한다.

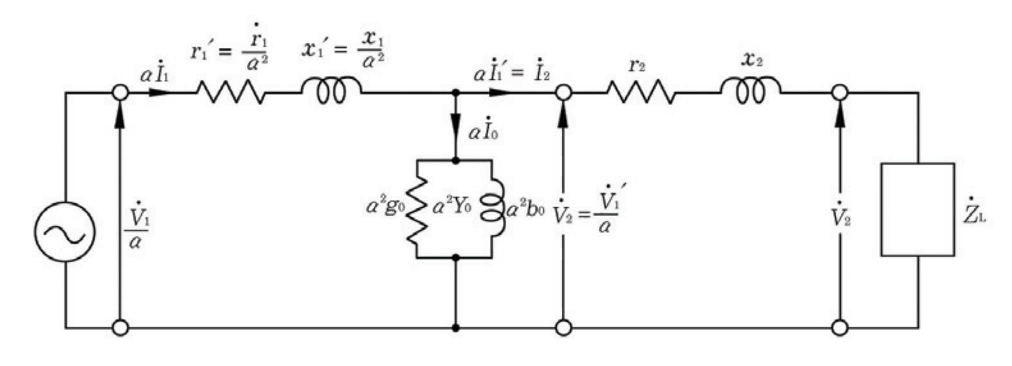


그림 Ⅲ－13 변압기의 등가 회로(2차 쪽으로 환산)

3. 간이 등가 회로

그림 Ⅲ-14는 변압기의 간이 등가 회로(simple equivalent circuit)이다. 실제 변압기에서 1차 권선의 임피던스 $\dot{Z}_1=r_1+jx_1$에 의한 전압 강하는 공급 전압 $\dot{V}_1$에 비하여 매우 작고, 여자 전류 $\dot{I}_0$도 $\dot{I}_1$에 비하여 매우 작으므로 여자 어드미턴스를 전원 쪽으로 옮겨서 생각하여도 거의 오차가 없다.

이와 같이, 변환한 등가 회로를 간이 등가 회로라고 하며, 변압기 특성을 계산하는 데 많이 사용한다.

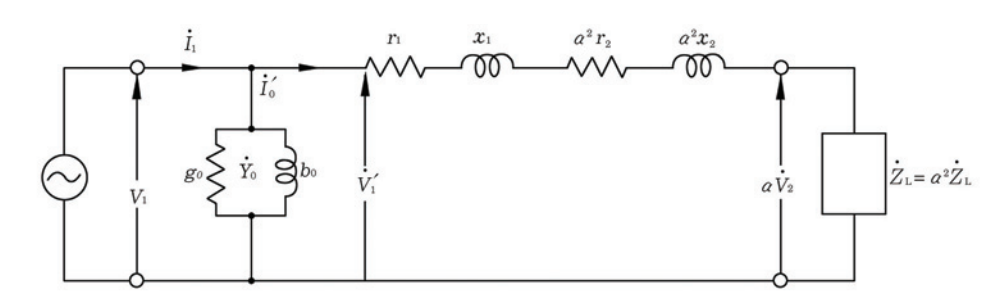


그림 Ⅲ-14 변압기의 간이 등가 회로

예제 2 1차 전압 6,600〔V〕, 2차 전압 220〔V〕의 단상 변압기가 있다. 2차 쪽에 환산한 권선의 저항은 $r_{21}=0.12$〔Ω〕, 누설 리액턴스 $x_{21}=0.1$〔Ω〕이다. 이 변압기에 10〔Ω〕의 저항 부하를 접속하면 1차 전류는 얼마나 흐르는가? 단, 여자 전류는 무시한다.

풀이 |

$$a=\frac{V_1}{V_2}=\frac{6600}{220}=30$$

$$Z_{21}=\sqrt{(r_{21}+R_L)^2+x_{21}^2}=\sqrt{(0.12+10)^2+0.1^2}=10.13$$

$$I_2=\frac{V_2}{Z_{21}}=\frac{220}{10.13}=21.72$$

$$I_1=\frac{I_2}{a}=\frac{21.72}{30}=0.724\text{〔A〕}$$

2 변압기의 정격, 손실과 효율

학습 목표 |

1. 변압기의 정격에 대하여 설명할 수 있다.
2. 변압기의 손실에 대하여 설명할 수 있다.
3. 변압기의 효율에 대하여 설명할 수 있다.

1 변압기의 정격

변압기의 정격이란, 지정된 조건 하에서 변압기를 사용할 수 있는 한도를 말하며, 정격 용량, 정격 전압, 정격 전류, 정격 주파수 등이 있고 변압기 외함에 부착된 명판에 표시되어 있다.

1. 정격 용량

변압기의 정격 용량은 정격 2차 전압, 정격 주파수, 정격 역률일 때에 2차 단자 간에 얻을 수 있는 피상 전력을 말하며, 단위는 〔VA〕, 〔kVA〕로 표시한다.

정격 용량〔VA〕= 정격 2차 전압 V_{2n}〔V〕× 정격 2차 전류 I_{2n}〔A〕

2. 정격 전압

변압기의 정격 2차 전압은 정격 용량의 출력을 내고 있을 때에 2차 권선의 단자 전압을 나타내며, 정격 1차 전압은 정격 2차 전압에 권수비 a를 곱한 값이 된다.

3. 정격 전류

변압기의 정격 2차 전류는 정격 용량을 정격 2차 전압으로 나눈 값이 되고, 정격 1차 전류는 정격 2차 전류를 권수비 a로 나눈 값이 된다.

4. 정격 주파수와 역률

변압기가 지정된 값으로 사용할 수 있게 제작된 주파수와 역률의 값을 말한다. 정격 역률은 특별히 지정되지 않으면 100〔%〕로 본다.

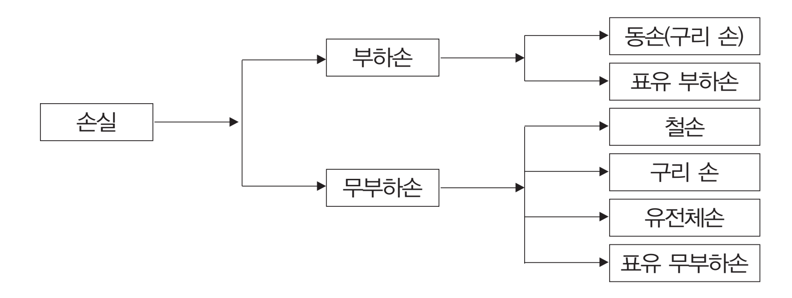
2 변압기의 손실

변압기는 회전 부분이 없기 때문에 기계적 손실이 발생하지 않으며, 회전 기기에 비하여 효율이 높아 소형인 경우 96[%]에서 대형인 경우에 99[%]의 효율을 보이는 것도 있다. 변압기 손실의 대부분은 철손(iron loss)과 구리 손(copper loss)에 의하여 발생한다.

변압기가 1차 쪽에서 2차 쪽으로 전력을 전달할 때, 변압기 내부에는 전력의 손실이 발생한다. 이때, 발생하는 손실을 변압기 손실이라고 하고, 이 손실의 크기가 전달되는 전력에 비하여 되도록 적은 변압기를 효율이 좋은 변압기라고 할 수 있다. 변압기 손실은 부하손(load loss)과 무부하손(no-load loss)의 두 가지 종류가 있다.

부하손은 2차 쪽에 부하가 있을 경우에 부하 전류의 흐름으로 인하여 발생하는 구리 손과 누설 자기력선속과 관련되는 권선 내의 손실, 외함, 볼트 등에 생기는 손실로 계산하기 어려운 표유 부하손(stray load loss)이 있다.

무부하손은 변압기가 무부하 상태에 있을 때 발생하는 손실로 주로 철손이고 여자 전류에 의한 동손과 절연물의 유전체손 그리고 표유 부하손이 있다. 철손은 철심에 생기는 손실로 히스테리시스손과 맴돌이 전류손으로 이루어진다. 철손의 대부분을 차지하는 히스테리시스손을 줄이기 위하여 히스테리시스 정수가 작은 규소 강판을 사용하며, 맴돌이 전류손을 줄이기 위하여 얇은 강판을 적층하여 사용한다.



3 변압기의 효율

변압기의 효율을 나타내는 방법으로는 입력과 출력을 실제로 측정하여 계산한 실측 효율(measured efficiency by input-output test)과 규약에 따라 손실을 결정하여 산출하는 규약 효율(conventional efficiency)이 있다. 변압기의 효율은 규약 효율을 표준으로 하고 있다.

1. 실측 효율

실측 효율은 실제로 변압기에 부하를 연결하고 전력계를 사용하여 측정한 결과로 계산한 효율을 말하며, 다음과 같이 효율 η를 구한다.

$$\eta=\frac{\text{출력[kW]}}{\text{입력[kW]}}=\frac{\text{2차 쪽에 있는 전력계에 나타난 전력 } P_2}{\text{1차 쪽에 있는 전력계에 나타난 전력 } P_1}\times 100[\%] \qquad (\text{Ⅲ}-12)$$

그러나 이 방법은 실제로 정격 전압을 가해 주고 정격 전류를 흘려야 하기 때문에 시설이 많이 필요하고 큰 전력이 소모된다. 이러한 이유로 실측 효율은 거의 사용되지 않는다.

2. 규약 효율

변압기의 효율은 정격 2차 전압 및 정격 주파수에 대한 출력과 전체 손실을 알면 효율 η는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta=\frac{\text{출력[kW]}}{\text{출력[kW]}+\text{전체 손실[kW]}}\times 100[\%] \qquad (\text{Ⅲ}-13)$$

여기서, 손실은 변압기의 무부하손(철손)과 부하손(동손)을 말한다.

정격 2차 전압을 V_{2n}[V], 정격 2차 전류를 I_{2n}[A], 부하의 역률을 $\cos\theta$, 철손을 P_i[W], 2차 쪽으로 환산한 전체 저항을 r_{21}[Ω]이라고 하면, 규약 효율 η는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\eta=\frac{\text{출력}}{\text{출력}+\text{철손}+\text{동손}}\times 100[\%]$$

$$=\frac{V_{2n}I_{2n}\cos\theta}{V_{2n}I_{2n}\cos\theta+P_i+r_{21}I_{2n}^2}\times 100[\%] \qquad (\text{Ⅲ}-14)$$

이와 같이 정격 출력과 무부하손과 부하손을 알고 위 식에 따라 계산한 효율을 규약 효율이라고 하며, 변압기의 효율을 계산하는 데에 사용한다.

3. 최대 효율

변압기가 임의의 부하(부하 전류 I_2[A])에서 운전하고 있을 때, 변압기의 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta=\frac{V_{2n}I_{2n}\cos\theta}{V_{2n}I_2\cos\theta+P_i+r_{21}I_2^2}\times 100[\%] \qquad (\text{Ⅲ}-15)$$

위의 식에서 정격 2차 전압 V_{2n}과 역률 $\cos\theta$이 일정할 때에 효율 η가 최대가 되기 위한 조건은 부하손($r_{21}I_2^2$)과 무부하손(P_i)의 합이 최소가 되는 경우, 즉 부하손과 무부하손이 같아지는 경우이다.

$$r_{21}I_2^2 = P_i[\mathrm{kW}] \quad (\text{Ⅲ}-16)$$

즉, 철손 P_i[W]과 동손 P_c[W]가 같을 때에 최대 효율이 된다. 보통 변압기에서 최대 효율 조건은 정격 부하의 70[%]일 때이며, 이때 철손과 동손의 비는 $P_i : P_c = 1 : 2$이다.

4. 전일 효율

배전용 변압기는 부하 변동이 심하고 전부하에서 사용되는 시간은 하루 중에서 몇 시간에 불과하다. 하루 중에서 변압기의 출력 전력량과 입력 전력량의 백분율 비를 전일 효율(all day efficiency) η_d라고 한다.

변압기의 전일 효율 η_d는 다음과 같이 나타내며, 일반적으로 전일 효율은 전부하의 50~60[%] 정도이다.

$$\eta_d = \frac{24\text{시간의 출력}}{24\text{시간의 입력}} \times 100[\%] \quad (\text{Ⅲ}-17)$$

예제 3 200[kVA] 변압기의 철손이 1.6[kW], 전부하손이 2.4[kW]라고 한다. 전부하 역률에서의 효율을 구하여라. 단, 전부하 역률은 0.8이다.

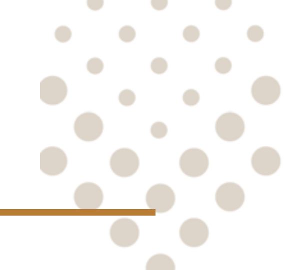
풀이 |

$$\eta = \frac{\text{출력}}{\text{출력}+\text{손실}} \times 100 = \frac{200 \times 0.8}{200 \times 0.8 + 1.6 + 2.4} \times 100 = 97.56[\%]$$

:: 참고자료

변압기 손실 예

용량[kVA]	사용 전압[V]	무부하손[W]	저항손[W]	표유 부하손[W]
1	3,300	37	39	–
15	3,300	183	261	–
100	11,000	834	1,520	115
3,000	66,000	15,600	21,800	2,200
15,000	154,000	57,000	73,800	12,200



3 변압기의 특성

학습 목표 |

1. 변압기의 전압 변동률에 대하여 설명할 수 있다.
2. 변압기의 온도 상승에 따른 냉각 방식을 설명할 수 있다.

1 전압 변동률

1. 전압 변동률

변압기의 2차 단자 전압은 무부하일 때에 비하여 정격 부하를 접속하면 다소 감소한다. 변압기의 전압 변동률은 전부하 시와 무부하 시의 2차 단자 전압의 변동 정도를 나타내어 주는 것으로, 이 값이 크면 부하의 증감에 따라 2차 전압 변동이 크다는 것을 의미한다.

그림 Ⅲ－15와 같이 변압기의 2차 단자에 정격 부하를 접속하고 스위치 SW를 닫은 다음, 부하와 1차 전압 V_1을 조정하여 전압계 ⓥ2에서 나타나는 2차 전압 V_2가 정격 전압 V_{2n}이 되고, 전류계 Ⓐ2에 나타나는 2차 전류 I_2가 정격 전류 I_{2n}이 되게 한다.

이 상태에서 스위치 SW를 열면 부하에 흐르는 2차 전류는 0[A]이 되며, 2차 단자에 걸리는 전압은 상승하게 되고 전압계 V_2에서 V_{20}의 값을 얻으면 이때의 전압 변동률 ε[%]를 다음과 같이 나타낸다.

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100[\%] \qquad (Ⅲ－18)$$

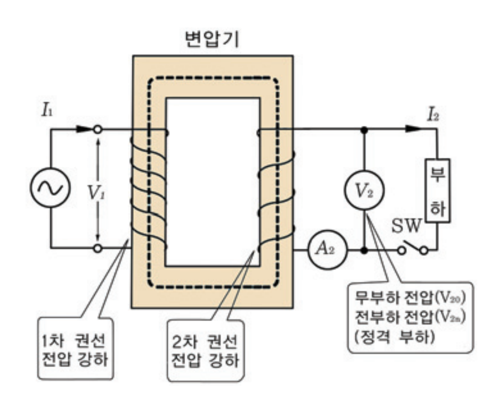


그림 Ⅲ－15 전압 변동률

이 전압 변동률은 부하의 증감에 따라 2차 단자 전압이 변동하는 정도를 나타내어 주며, 전압 변동률이 큰 변압기는 부하의 증감에 따라 2차 단자 전압의 변동이 크게 나타난다. 이것은 1차와 2차 권선의 저항과 누설 리액턴스에 의한 전압 강하가 생기기 때문이다.

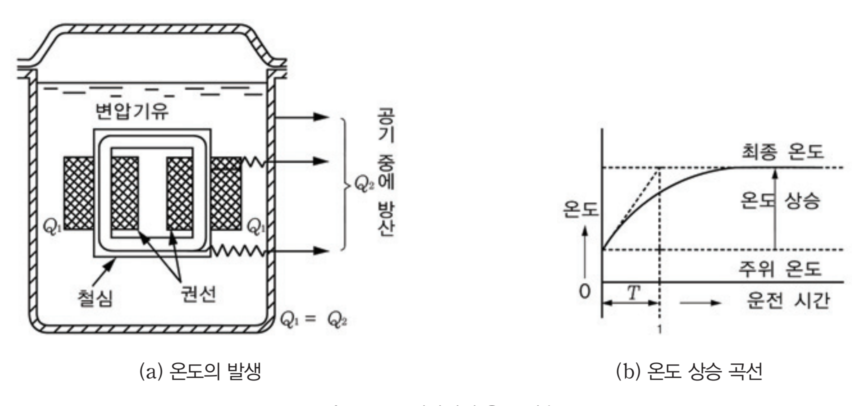
전압 변동은 전등의 광속, 수명, 전동기의 출력 등에 영향을 주는 중요한 요인이 된다. 따라서, 전압 변동률 값이 적을수록 좋으며, 될 수 있는 대로 권선 저항이나 리액턴스를 적게 하여야 한다.

2 변압기의 온도 상승과 냉각

1. 온도 상승

부하를 접속할 때에 발생하는 변압기 손실은 열로 나타나고 발생된 열은 일부분만 절연물과 외함으로 전달되어 공기 중으로 발산된다. 나머지는 변압기 내부의 철심, 권선 또는 절연물에 축적되어 변압기의 온도를 상승시킨다.

온도가 상승한 상태에서 변압기를 오랜 시간 동안 사용하면 변압기의 절연물이 열화되어 절연 내력이 약화되고 수명이 단축된다. 따라서, 변압기는 적절한 냉각 방법을 통하여 냉각시킬 필요가 있다.



(a) 온도의 발생

(b) 온도 상승 곡선

그림 Ⅲ-16 변압기의 온도 상승

2. 냉각 방식

변압기를 냉각하는 방식은 공기를 이용하는 건식과 절연유를 이용하는 유입식이 있으며, 다음과 같은 방식이 주로 사용된다.

(1) 건식 자랭식(air－cooled type, AN)

변압기 본체가 공기에 의하여 자연적으로 냉각되게 한 것으로, 일반적으로 10〔MVA〕 미만의 소용량 변압기의 냉각에 사용된다.

(2) 건식 풍랭식(air－blast type, AF)

건식 변압기에 송풍기를 이용하여 강제 통풍을 시키는 방식으로, 냉각 효과는 있으나 변압기유를 사용하지 않는 방식이다. 500〔kVA〕 이상에 채용하고 있다.

(3) 유입 자랭식(oil－immersed self－cooled type, ONAN)

변압기유를 충분히 채운 외함 내에 변압기 본체를 넣고 권선과 철심에서 발생한 열을 기름의 대류 작용에 의하여 외함에 전달되게 하고, 외함에서 열을 대기로 발산시키는 방식이다.

외함은 열의 발산을 좋게 하기 위하여 주름 철판을 사용하여 표면적을 크게 하고, 대형 변압기의 경우에는 방열기(radiator)를 설치하여 냉각 효과를 보다 좋게 한다. 이 방식은 보수가 간단하고 취급이 쉽기 때문에 45〔MVA〕 정도의 대형 변압기에까지 널리 사용되고 있다.

(4) 유입 풍랭식(oil－immersed air－blast type, ONAF)

방열기를 설치한 유입 변압기에 송풍기를 이용하여 강제 통풍을 시킴으로써 냉각 효과를 높이는 방식으로 유입 자랭식보다 용량을 20～30〔%〕 정도 증가시킬 수 있으므로 60〔MVA〕까지의 대형 변압기에 많이 사용되고 있다.

(5) 송유 풍랭식(oil－immersed forced circulating air－blast type, OFAF)

변압기 외함 내에 들어 있는 기름을 송유 펌프를 이용하여 외부에 있는 냉각 장치로 보내 냉각시킨 다음, 다시 외함으로 공급하는 방식으로 냉각 효과가 크기 때문에 60〔MVA〕 이상의 대용량 변압기에는 이 방식이 주로 사용된다.

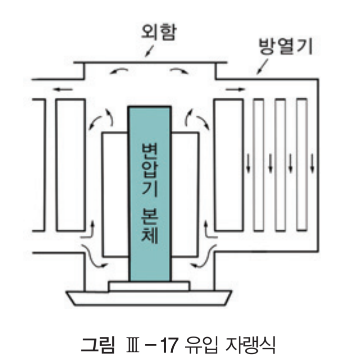


그림 Ⅲ－17 유입 자랭식

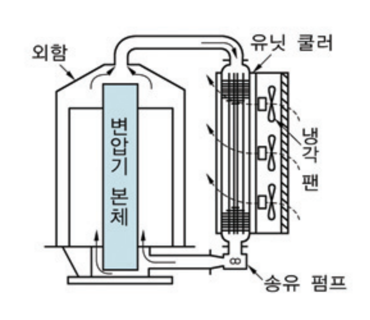


그림 Ⅲ－18 송유 풍랭식

3. 변압기유

변압기 본체의 온도 상승을 억제하기 위한 방법의 하나로 기름 속에 변압기 본체를 담가 냉각시키는 방법이다. 이때 사용하는 기름을 변압기유(transformer oil)라고 하며, 사용 목적은 권선의 절연과 냉각이다. 변압기유가 갖추어야 할 조건은 다음과 같다.

① 절연 내력이 높아야 한다. 변압기유의 절연 내력은 공기의 4~5배가 되나 수분이 포함되면 절연 내력이 급격히 저하된다.

② 인화의 위험성이 없고 인화점이 높으며 사용 중의 온도로 발화하지 않아야 한다.

③ 화학적으로 안정하고 변압기의 구성 재료인 철, 구리, 절연물 등을 변화시키지 않아야 하며, 또 이것들에 의하여 영향을 받지 않아야 한다.

④ 고온에서 침전물이 생기거나, 산화하지 않아야 한다.

⑤ 응고점이 낮아야 한다.

⑥ 냉각 작용이 좋고 비열과 열전도도가 크며 점성도가 적고 유동성이 풍부하여야 한다.

⑦ 중량이 적어야 한다.

:: 참고자료

주요 약어의 설명

- AN: Air Natural
- AF: Air Forced
- ONAN(OA): Oil Natural Air Natural
- ONAF(FA): Oil Natural Air Forced
- OFAN: Oil Forced Air Natural
- OFAF(FOA): Oil Forced Air Forced
- ONWF(OW): Oil Natural Water Forced
- OFWF(FOW): Oil Forced Water Forced



변압기의 병렬 운전과 결선

학습 목표 |

1. 변압기의 극성을 판별하고 병렬 운전 조건을 설명할 수 있다.
2. 변압기의 3상 결선 방법의 종류와 장단점을 설명할 수 있다.

1 변압기의 극성

변압기의 극성이란, 어떤 순간에 1차 권선의 단자 H_1-H_2, 2차 권선의 단자 X_1-X_2 간에 유도되는 유도 기전력의 방향을 의미한다. 변압기의 1차 단자와 2차 단자에 나타나는 전압의 극성은 그림 Ⅲ－19와 같이 철심에 감은 권선의 방향에 따라 달라진다.

변압기를 단독으로 운전하는 경우에는 극성을 무시하여도 아무런 문제가 없으나 3상 결선을 하거나 병렬 운전을 할 경우에는 각 변압기의 극성을 알아야 한다. 극성이 잘못되면 변압기에 매우 큰 순환 전류가 흘러 변압기의 권선간 절연이 파괴된다.

변압기의 극성은 제작 방법에 따라 감극성(subtractive polarity)과 가극성(additive polarity)으로 구분되며, 우리나라는 감극성을 표준으로 사용하고 있다.

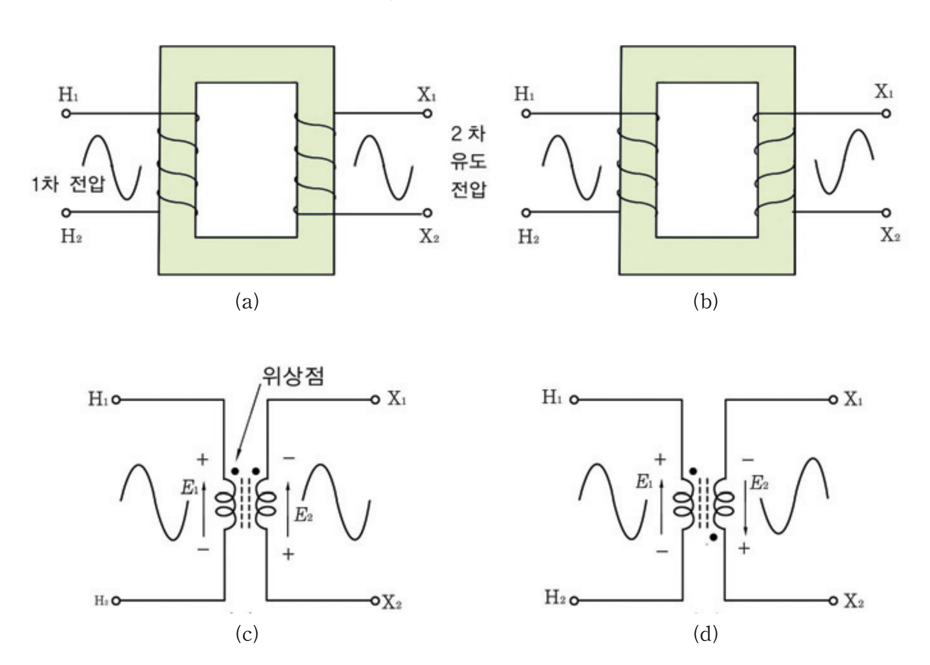


그림 Ⅲ－19 변압기 권선의 방향과 극성

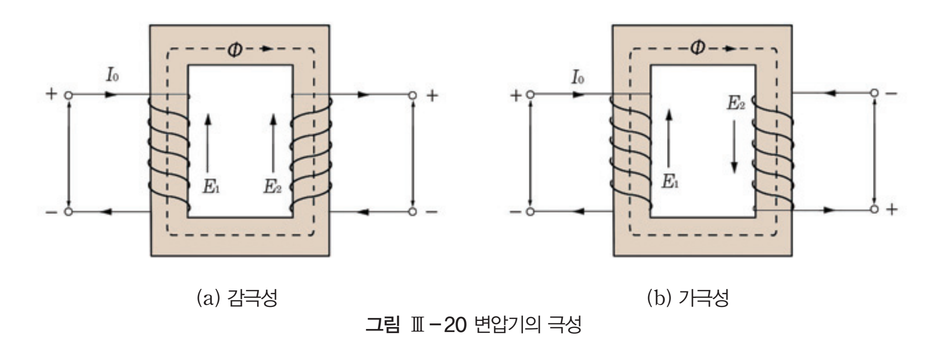


그림 Ⅲ－20 변압기의 극성

그림 Ⅲ－20과 같이 1차 쪽 권선에 전원을 접속하였을 때에 철심 속의 자기력선속 Φ는 화살표 방향으로 증가한다. 이때, 1차 권선에서 발생하는 유도 기전력 E_1과 2차 권선에서 발생하는 유도 기전력 E_2의 방향이 동일 방향으로 되는 것을 감극성이라고 하고, 그림 Ⅲ－20의 (a)와 같이 (＋), (－)의 단자 기호를 붙인다. E_1과 E_2의 방향이 반대로 되는 것을 가극성이라고 하고, 그림 Ⅲ－20의 (b)와 같이 단자 기호를 붙인다. 여기에서 (＋), (－)의 기호 대신에 고압 쪽에 U, V, 저압 쪽에 u,v의 기호를 붙이는 경우도 있다.

2 병렬 운전

부하의 증가로 변압기의 용량이 정격을 초과하게 되면 그림 Ⅲ－21과 같이 새로운 변압기를 기존의 변압기와 병렬로 연결하여 운전할 필요가 있다. 이와 같은 경우를 병렬 운전(parallel running)이라고 한다. 각 변압기가 정상적인 병렬 운전을 하게 되면 변압기의 운전 상태는 다음과 같이 유지된다.

첫째, 각 변압기가 그 용량에 비례하여 부하를 분담한다. 둘째, 각 변압기에 대한 전류의 대수합은 항상 전체의 부하 전류와 같다. 셋째, 병렬로 연결되어 있는 각 변압기의 폐회로에 순환 전류가 흐르지 않는다.

1. 변압기의 병렬 운전 조건

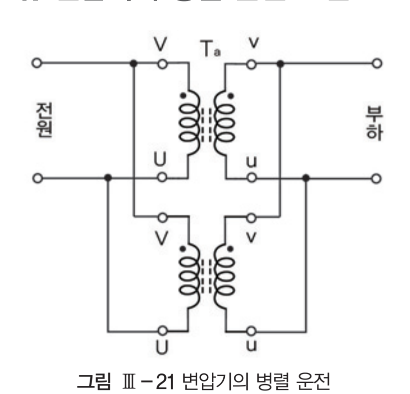


그림 Ⅲ－21 변압기의 병렬 운전

변압기의 병렬 운전 조건은 다음과 같다.

(1) 극성이 같아야 한다.

변압기를 병렬 운전할 때에 가장 중요한 것은 각 변압기의 전압 극성을 맞추는 일이다. 만일, 극성을 잘못 접속할 때에는 2차 권선으로 구성된 폐회로에 매우 큰 순환 전류가 흘러서 변압기의 권선이 타 버리게 된다.

(2) 권수비, 1차와 2차의 정격 전압이 같아야 한다.

권수비가 다른 경우에도 2차 유도 기전력의 크기가 서로 다르게 되므로 2차 권선의 폐회로에 순환 전류가 흐른다. 이 전류에 의하여 권선이 가열되고, 파손된다.

(3) 각 변압기의 임피던스가 정격 용량에 반비례하여야 한다.

2대의 변압기를 병렬 운전하는 경우, 두 변압기에 흐르는 전류와 임피던스를 각각 I_1, Z_1와 I_2, Z_2라고 하면 다음 식이 성립한다.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \qquad (\text{Ⅲ} - 19)$$

이 식으로부터 각 변압기에 흐르는 부하 전류는 두 변압기의 임피던스 값에 반비례하는 것을 알 수 있다. 따라서, 각 변압기가 그 용량에 비례하여 부하를 분담하기 위하여는 각 변압기의 임피던스가 정격 용량에 반비례하여야 한다.

예를 들어, 100[kVA] 단상 변압기 1대와 200[kVA] 단상 변압기 1대를 병렬 운전하여 150[kVA] 부하에 전력을 공급하는 경우에 100[kVA] 용량의 변압기는 50[kVA]의 부하를 분담하고, 200[kVA] 용량의 변압기는 100[kVA]의 부하를 분담하게 된다. 이때, 100[kVA] 용량의 변압기 임피던스가 1[Ω]이라면 200[kVA] 용량 변압기의 임피던스는 0.5[Ω]이어야 한다.

(4) 각 변압기의 저항과 리액턴스의 비가 같아야 한다.

3 3상 결선

3대의 단상 변압기를 사용하여 3상 변압기로 이용할 경우에는 단상 변압기는 다음과 같은 조건이 필요하다.

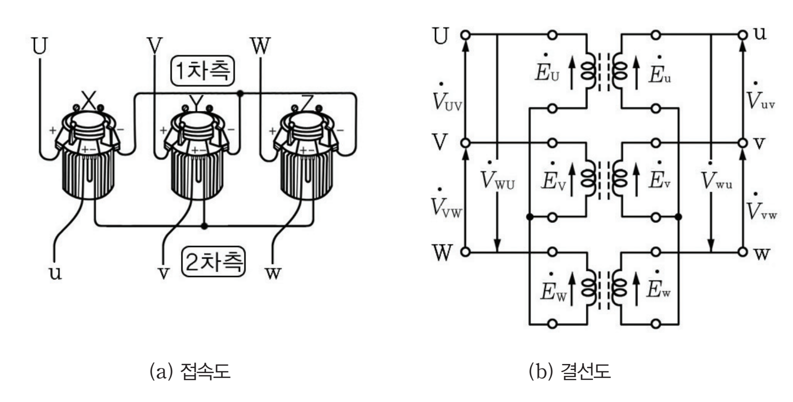
첫째, 용량, 주파수, 전압 등의 정격이 같아야 한다.

둘째, 권선의 저항, 누설 리액턴스, 여자 전류 등이 같아야 한다.

단상 변압기 3대를 이용하여 3상 결선을 하는 방법은 Y－Y, Δ－Δ, Δ－Y, Y－Δ 결선의 네 가지 종류가 있다. 이 밖에도 단상 변압기 두 대를 결선하는 V－V 결선이 있다.

1. Y－Y 결선

Y－Y 결선(star－star connection)은 변압기의 1차 쪽과 2차 쪽을 모두 Y 결선으로 접속한 3상 결선 방식이다. 그림 Ⅲ－22는 Y－Y 결선에 대한 실제 접속도와



(a) 접속도 (b) 결선도

그림 Ⅲ-22 Y－Y 결선

결선도를 나타내고 있다.

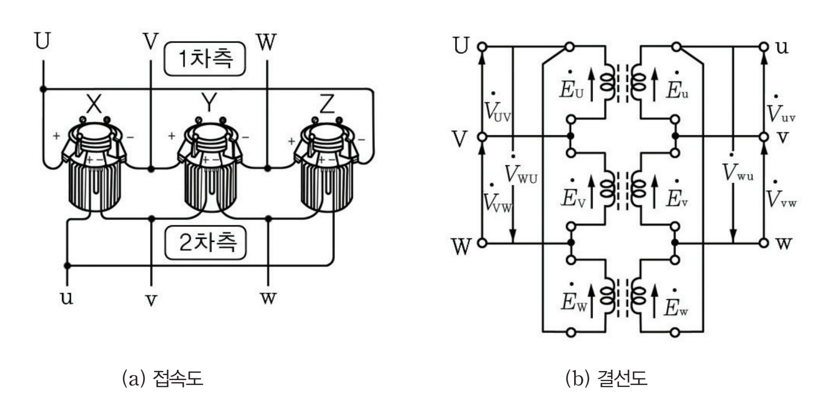
Y 결선한 1차 쪽 단자 U, V, W에 선간 전압 $\dot{V}_{UV}=\dot{V}_{VW}=\dot{V}_{WU}=V_1$[V]가 가해지면 변압기의 1차 권선에는 선간 전압의 $\frac{1}{\sqrt{3}}$배, 위상이 30° 뒤진 $\dot{E}_U=\dot{E}_V=\dot{E}_W=\dot{E}_1$[V] $=\frac{1}{\sqrt{3}}\dot{V}_1$의 1차 유도 기전력이 발생한다. 또, 2차 권선에는 각각 크기가 1차 유도 기전력의 $\frac{1}{a}$배이면서 같은 상의 2차 유도 기전력 $\dot{E}_u=\dot{E}_v=\dot{E}_w=\dot{E}_2$[V]$=\frac{1}{a}\dot{E}_1$이 발생된다. 2차 쪽 단자 u, v, w는 2차 유도 기전력의 $\sqrt{3}$배이며 위상이 30° 앞선 선간 전압 $\dot{V}_{uv}=\dot{V}_{vw}=\dot{V}_{wu}=V_2$[V]가 나타나며 이 선간 전압이 부하에 인가된다. Y－Y 결선의 장단점은 표 Ⅲ－1과 같다.

표 Ⅲ-1 Y－Y 결선의 장단점

장점	단점
• 1, 2차의 전압에 위상차가 없다. • 1, 2차 모두 Y 결선이므로 중성점을 접지할 수 있으며, 고압의 경우에 이상 전압을 감소시킬 수 있다. • 상전압이 선간 전압의 $\frac{1}{\sqrt{3}}$배이므로 절연이 용이하여 고전압에 유리하다.	• 중성점이 접지되어 있지 않으면 제3 고조파 통로가 없어 기전력 파형은 제3 고조파를 포함하는 왜형파가 된다. • 중성점이 접지되어 있으면 접지선을 통하여 제3 고조파 전류가 흘러 통신 장애를 일으킨다.

2. Δ－Δ 결선

Δ－Δ 결선(delta－delta connection)은 변압기의 1차 쪽과 2차 쪽을 모두 Δ 결선으로 접속한 3상 결선 방식이다. 그림 Ⅲ－23은 Δ－Δ 결선에 대한 실제 접속도와 결선도를 나타내고 있다.



(a) 접속도 (b) 결선도

그림 Ⅲ-23 Δ-Δ 결선

변압기의 1차 권선의 단자에는 선간 전압 $\dot{V}_{UV}=\dot{V}_{VW}=\dot{V}_{WU}=\dot{V}_1$[V]가 그대로 가하여지고, 1차 유도 기전력 $\dot{E}_U=\dot{E}_V=\dot{E}_W=\dot{E}_1$[V]가 발생한다. 이때, 권선 중의 상전류는 선전류의 $\frac{1}{\sqrt{3}}$배가 된다. 또, 2차 권선에는 각각 크기가 1차 유도 기전력의 $\frac{1}{a}$배인 2차 유도 기전력 $\dot{E}_u=\dot{E}_v=\dot{E}_w=\frac{1}{a}\dot{E}_1$이 발생하고, 이 전압이 직접 부하에 공급된다. Δ-Δ 결선의 장단점은 표 Ⅲ-2와 같다.

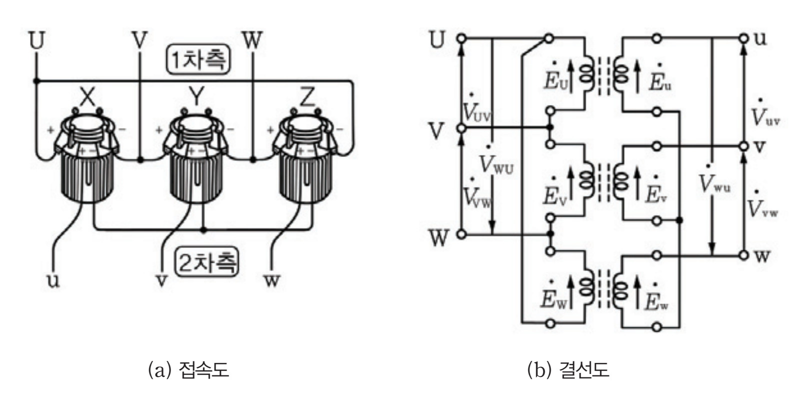
표 Ⅲ-2 Δ-Δ 결선의 장단점

장점	단점
• 1, 2차의 전압은 위상차가 없고, 상전류는 선전류의 $\frac{1}{\sqrt{3}}$이다. • 제3 고조파 여자 전류 통로를 가지게 되므로 사인파 전압을 유기한다. • 변압기 외부에 제3 고조파가 발생하지 않아 통신 장애가 없다. • 변압기 세 대 중에서 한 대가 고장이 나도 V-V 결선으로 운전하여 정격 출력의 57.7[%]가 되는 3상 전력을 사용할 수 있다.	• 중성점 접지가 안 되어 지락 사고 시 보호가 곤란하다. • 상부하 불평형일 때에 순환 전류가 흐른다. 선간 전압과 상전압이 서로 같기 때문에 고압인 경우에 절연이 어려워 60[kV] 이하의 저전압, 대전류용인 배전용 변압기에만 주로 사용된다.

3. Δ-Y 결선

Δ-Y 결선(delta-star connection)은 변압기의 1차 쪽은 Δ 결선으로 접속하고, 2차 쪽은 Y 결선으로 접속한 3상 결선 방식이다. 그림 Ⅲ-24는 Δ-Y 결선에 대한 실제 접속도와 결선도를 나타내고 있다.

Δ-Y 결선의 경우에도 Δ-Δ 결선에서와 마찬가지로 2차 권선에는 각각 크기가 1차 유도 기전력의 $\frac{1}{a}$배인 2차 유도 기전력 $\dot{E}_u=\dot{E}_v=\dot{E}_w=\frac{1}{a}\dot{E}_1$이 발생한다. 그러나



(a) 접속도 (b) 결선도

그림 Ⅲ-24 Δ-Y 결선

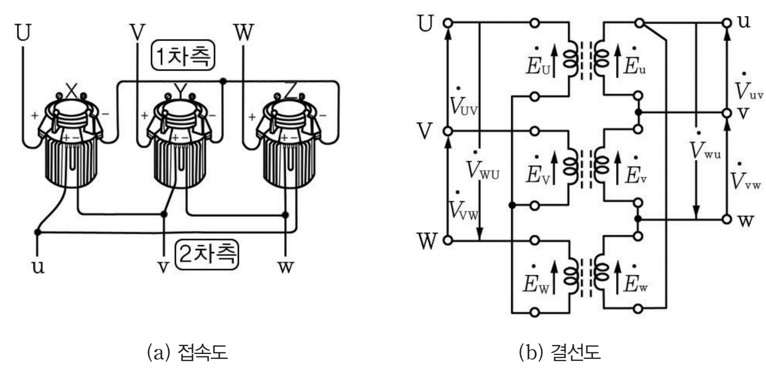
2차 쪽의 단자 u, v, w에는 2차 유도 기전력 $\dot{E}_u = \dot{E}_v = \dot{E}_w = \dot{E}_2$의 $\sqrt{3}$배가 되는 전압 $\dot{V}_{uv} = \dot{V}_{vw} = \dot{V}_{wu} = \sqrt{3}\dot{E}_2$가 나타나게 된다.

이 Δ-Y 결선법은 2차 쪽의 선간 전압이 V_{uv}가 변압기의 권선 전압 E_u의 $\sqrt{3}$배가 되므로, 발전소용 변압기와 같이 낮은 전압을 높은 전압으로 올리는 경우에 주로 사용된다.

4. Y-Δ 결선

Y-Δ 결선(star-delta connection)은 변압기의 1차 쪽은 Y 결선으로 접속하고, 2차 쪽은 Δ 결선으로 접속한 3상 결선 방식이다. 그림 Ⅲ-25는 Y-Δ 결선에 대한 실제 접속도와 결선도를 나타내고 있다.

변압기의 1차 쪽 단자 U, V, W에 선간 전압 $\dot{V}_{UV} = \dot{V}_{VW} = \dot{V}_{WU} = \dot{V}_1$[V]가 가해지면서 변압기의 1차 권선에는 선간 전압의 $\frac{1}{\sqrt{3}}$배인 $\dot{E}_U = \dot{E}_V = \dot{E}_W = \dot{E}_1[V] = \frac{1}{\sqrt{3}} V_1$의 1차 유도 기전력이 발생한다. 또, 2차 권선에는 각각 크기가 1차 유도 기전력의 $\frac{1}{a}$인 2차 유도 기전력 $\dot{E}_u = \dot{E}_v = \dot{E}_w$가 발생한다.



(a) 접속도 (b) 결선도

그림 Ⅲ-25 Y-Δ 결선

이 전압은 선간 전압 $\dot{V}_{uv}=\dot{V}_{vw}=\dot{V}_{uw}=\dot{V}_2$[V]가 되어 직접 부하에 공급된다. Δ−Y와 Y−Δ 결선의 장단점은 표 Ⅲ−3과 같다.

표 Ⅲ-3 Δ−Y와 Y−Δ 결선의 장단점

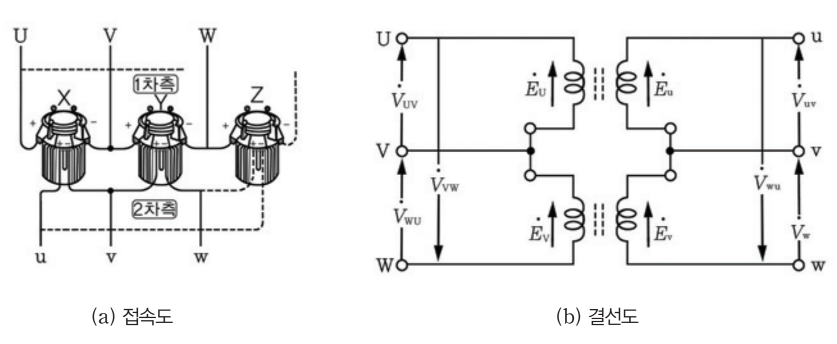
장점	단점
• 한쪽 Y 결선의 중성점을 접지할 수 있다. • 한쪽이 Δ 결선으로 여자 전류의 제3 고조파 통로가 있으므로 제3 고조파의 장애가 적고, 기전력의 파형에 왜형파가 나타나지 않는다. • Δ−Y 결선은 승압(step up)용 변압기로 송전단 변전소용에, Y−Δ 결선은 강압(step down)용 변압기로 수전단 변전소용에 사용하여 송전 계통에 융통성 있게 쓰인다.	• 1차 선간 전압과 2차 선간 전압과의 사이에 30° 위상차가 생긴다. • 1상에 고장이 발생하면 송전을 계속할 수 없다.

5. V−V 결선

V−V 결선(V−V connection)은 Δ−Δ 결선 방식에 의하여 3상 변압을 하는 경우에 한 대의 변압기가 고장이 나면 고장난 변압기를 제거하고, 남은 두 대의 변압기를 이용하여 3상 전력을 변압하여 3상 부하에 전력을 계속 공급할 수 있는 결선 방식이다. 그림 Ⅲ−26은 V−V 결선에 대한 실제 접속도와 결선도를 나타내고 있다.

V−V 결선에서 출력 P_V는 Δ−Δ 결선의 출력 P_Δ에 비하여 $\frac{1}{\sqrt{3}}$로 작아져 부하 용량이 57.7[%]로 줄어들고, 변압기의 이용률도 86.6[%]로 줄어든다. V−V 결선에서 출력 P_V와 변압기 이용률 A는 다음과 같다.

$$P_V=\sqrt{3}\,V_{2n}I_{2n}\text{[VA]} \qquad (\text{Ⅲ}-20)$$



(a) 접속도 (b) 결선도

그림 Ⅲ−26 V−V 결선

$$A = \frac{P_V}{2P_i} = \frac{\sqrt{3}\,V_{2n}I_{2n}}{2V_{2n}I_{2n}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866 \qquad (Ⅲ-21)$$

여기서 P_i는 변압기 한 대의 용량이다.

V－V 결선은 설치 방법이 간단하고, 소용량이면 가격이 저렴하여 3상 부하에 널리 이용된다. 하지만, 이용률이 86.6[%], 출력이 57.7[%] 밖에 안 되고, 부하의 상태에 따라 2차 단자 전압이 불평형이 될 수 있는 단점을 가지고 있다.

예제 4 권수비가 a인 단상 변압기 세 대를 3상으로 결선하는 경우, 각종 결선($\Delta-\Delta$, $\Delta-Y$, $Y-\Delta$, $Y-Y$)방식의 1차 및 2차 선간 전압비와 선전류의 비를 구하여라.

풀이 |

① $\Delta-\Delta$ 결선의 경우

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = a \qquad \frac{I_{11}}{I_{12}} = \frac{\sqrt{3}I_1}{\sqrt{3}I_2} = \frac{1}{a}$$

② $\Delta-Y$ 결선의 경우

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{\sqrt{3}E_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}a \qquad \frac{I_{11}}{I_{12}} = \frac{\sqrt{3}I_1}{I_2} = \frac{\sqrt{3}}{a}$$

③ $Y-\Delta$ 결선의 경우

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sqrt{3}E_1}{E_2} = \sqrt{3}a \qquad \frac{I_{11}}{I_{12}} = \frac{I_1}{\sqrt{3}I_2} = \frac{1}{\sqrt{3}a}$$

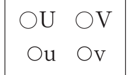
④ $Y-Y$ 결선의 경우

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sqrt{3}E_1}{\sqrt{3}E_2} = a \qquad \frac{I_{11}}{I_{12}} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{a}$$

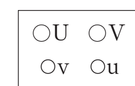
참고자료

변압기 극성 표시법

극성을 쉽게 구별하기 위하여 단자 기호를 붙인다. 이 기호는 표준 규약(KS C4304)에 정한 표시 방법을 사용한다.



감극성



가극성



변압기의 점검과 시험

학습 목표 |

1. 변압기의 점검과 보수 내용에 대하여 설명할 수 있다.
2. 변압기 절연물의 열화 원인, 열화 측정 방법을 설명할 수 있다.

1 변압기의 점검과 보수

1. 점검

변압기는 운전 중에 온도, 습도 및 공기와 접촉 등에 의하여 절연물이 점차 열화된다. 열화가 계속 진행되면 뇌 서지, 개폐 서지 등의 이상 전압 또는 외부 단락 시의 전기적 또는 기계적 이상 스트레스(stress)를 받을 경우에는 절연이 파괴될 위험성이 증가한다.

변압기를 점검과 유지 관리하는 목적은 변압기의 열화 정도를 파악하고 열화를 방지하며, 기대하는 본래의 수명을 유지하는 데에 있다.

변압기의 유지 관리는 변압기의 중요도, 종류, 용량, 전압 등의 여러 가지 요인에 따라 다르지만 일반적으로 운전 개시 직후에는 빈번한 점검, 정상 운전 시에는 순시 점검과 변압기를 정지시키고 실시하는 정기 점검으로 구분할 수 있다.

2. 보수

변압기유는 절연과 냉각 작용의 중요한 역할을 하고 있으므로 열화에 대하여 특별히 주의하여야 한다. 운전 중에도 주기적으로 외함 바닥에서 기름을 소량 꺼내어 절연 파괴 전압을 시험하여 열화가 있을 때에는 변압기유를 여과시켜야 한다. 부싱은 먼지가 끼지 않게 청결히 하고, 유입 부싱에서는 유량에 주의를 기울여야 한다. 그리고 통풍 장치가 붙은 변압기에 흡습제가 있을 때에는 때때로 흡습제를 교환한다.

변압기유 열화 방지 장치가 없는 변압기의 본체는 5～10년에 1회 정도 외함에서 꺼내어 점검하고, 침전물 등을 제거한다. 이 작업은 맑은 날에 실시하고 습기가 스며들지 않게 주의하며, 절연 저항이 저하되어 있으면 건조시킨다.

운전에서는 부하의 상황에 주의하고, 전압이나 전류값의 불평형, 기름의 온도 상승

을 점검하며, 이상이 발견되면 적절한 처리를 한다. 그리고 이에 대한 정보를 기록하여 두면 이상을 예측하여 고장을 미연에 방지할 수 있다.

3. 건조

변압기의 권선과 철심을 건조함으로써 습기를 없애고 절연을 향상시킬 수 있다. 건조 방법에는 열풍법, 단락법, 진공법이 있다.

(1) 열풍법

열풍법은 송풍기와 전열기에 의하여 뜨거운 바람을 보내어 건조한다. 건조의 정도는 권선과 철심간, 권선 상호 간의 절연 저항을 측정하여 알 수 있다. 처음 열 시간 정도는 절연 저항이 내려가지만, 이후에는 올라간다. 절연 저항값이 일정한 값 이상으로 되면 건조를 정지한다.

(2) 단락법

단락법은 변압기의 1차 권선 또는 2차 권선을 단락하고, 다른 권선에 임피던스 전압의 약 20[%] 정도를 인가시켜 단락 전류에 의한 동손을 이용하여 가열 건조한다.

(3) 진공법

진공법은 주로 제조 공정에서 사용하는 방법으로 건조가 빠르고 결과도 좋다. 변압기를 탱크에 넣어 밀봉하고, 그 속에 증기가 통하는 관을 설치하여 보일러를 이용하여 가열하는 한편, 진공 펌프로 탱크 내의 공기를 빼내고 절연물 속의 습기를 증발 건조시킨다. 탱크 내의 온도는 80~90℃ 정도로 한다.

2 절연물의 열화

1. 절연물의 열화 원인

변압기 절연물의 열화는 다음과 같은 주요 원인에 의하여 발생한다. 그리고 실제는 이들 요소가 중복되어 열화가 진행된다.

(1) 열로 인한 열화

변압기에서 발생하는 열과 주위 온도에 의하여 변압기 내부의 온도가 상승하여 산화, 열 분해 등으로 절연유의 내전압이 내려가거나, 고체 절연물의 기계적 강도와 절

연 내력이 저하된다.

(2) 흡수로 인한 열화

절연유와 고체 절연물이 대기 중의 수분을 흡수하여 절연 내력이 저하되고, 고체 절연물은 기계적 강도가 저하된다.

(3) 부분 방전으로 인한 열화

절연체에 가해진 전기장의 세기가 한도를 초과하였을 때에 절연물 내에서 부분적으로 발생하는 방전으로 인한 열화이다. 절연물의 탄화로 인하여 절연 내력과 기계적 강도가 저하된다.

(4) 기계적 응력으로 인한 열화

변압기 부하 쪽에서 단락 사고가 발생하면 전자 기계력, 이상 진동 또는 충격으로 고체 절연물 또는 구조물이 기계적으로 파괴된다.

2. 절연물의 열화 정도를 파악하는 방법

변압기 절연물의 열화 정도를 파악하는 방법으로는 절연 저항 측정, 유전 정접($\tan\delta$), 흡수 전류나 잔율 측정, 유중 가스 분석 등이 있다.

(1) 절연 저항 측정

절연 저항 시험은 일반적으로 사용하여 절연 저항계로, 모든 시험에 앞서 실시한다. 절연물에 직류 전압을 인가하면 유전 현상에 의하여 변위 전류, 흡수 전류와 누설 전류가 흐르며 마지막에는 누설 전류만 흐른다. 이때의 절연물의 저항을 절연 저항이라고 하며, 보통 1분 값을 사용한다. 이 누설 전류는 절연물의 종류와 흡수, 오손, 열화의 상태에 따라 대폭 증가하는 경향을 가지고 있다. 이 때문에 절연 저항을 열화의 정도로 파악하는 방법으로 이용한다.

절연 저항의 측정은 1,000[V] 또는 2,000[V]의 전자식 절연 저항계를 사용하고, 권선과 권선 간 그리고 각 권선과 외함 간에 실시한다.

(2) 유전 정접 시험

유전 정접 실험은 보통 $\tan\delta$ 시험이라고도 한다. 유전체에 교류 전압을 인가하면 손실이 있기 때문에 전전류 I는 충전 전류 I_C보다 뒤지며 이 뒤진 각 δ를 손실각이라고 한다. 일반적으로 $\tan\delta \fallingdotseq \sin\delta = \cos\delta$의 관계가 있으며, 이 $\tan\delta$를 유전 정접이라고

하며 [%]로 표시한다. 또, 교류 전압을 인가하였을 때에 유전체 내에서 소비되는 전력 손실을 유전 손실이라 하며 그 크기는 다음과 같다.

$$W = VI\cos\delta \fallingdotseq \omega CV^2 \tan\delta \qquad (\text{Ⅲ}-22)$$

단, C는 절연물의 캐패시턴스, ω는 전원의 각주파수이다.

이와 같이, 유전 손실은 유전 정접(tanδ)에 비례하며, 이 유전 정접은 사용하고 있는 절연물의 온도, 습도, 상태 등에 관계되는 고유한 값으로 절연물의 형태나 치수에는 관계가 없기 때문에 변압기의 절연물의 성질과 상태를 표시하는 기준으로 삼고 있다. 유전 정접의 측정은 셰어링 브리지(sharing bridge)를 이용한 측정기, 전자식 탄델타 미터(tanδ meter)를 사용한다.

(3) 유중 가스 분석 시험

변압기 내부에서 국부 과열이나 방전이 생기면 그 온도와 발생 장소에 따라 다른 분해 생성물이 생긴다. 변압기에서 채취한 변압기유 중의 용해 가스를 추출, 분석하여 내부 이상 유무와 그 내용을 진단하는 방법을 유중 가스 분석이라고 한다. 이 방식은 변압기를 정지시키지 않고 약간의 내부 이상도 점검할 수 있는 특징을 가지고 있다.

(4) 변압기유의 절연 내력 시험

변압기의 절연유에 수분이 포함되어 있으면 절연 내력은 급격히 저하된다. 변압기유의 절연 내력 시험을 통하여 절연 내력이 낮으면 변압기유를 교환 또는 여과 등의 보수를 하여야 한다.

절연 내력 시험은 변압기유 중에 설치되어 있는 전극에 상용 주파수의 교류 전압을 절연이 파괴될 때까지 올려 절연 파괴 전압을 측정한다. 시험할 때의 용기는 150[mL] 이상의 변압기유를 넣을 수 있는 것을 사용하며, 전극은 지름이 12.5[mm]의 공 모양의 전극을 사용한다. 전극 간 공극은 2.5[mm]로 하며, 상용 주파수의 전압을 인가할 경우의 절연 파괴 전압은 30[kV] 이상이 되면 좋다.

6 특수 변압기

학습 목표 |

1. 단권 변압기의 원리를 설명할 수 있다.
2. 계기용 변성기의 원리를 설명할 수 있다.

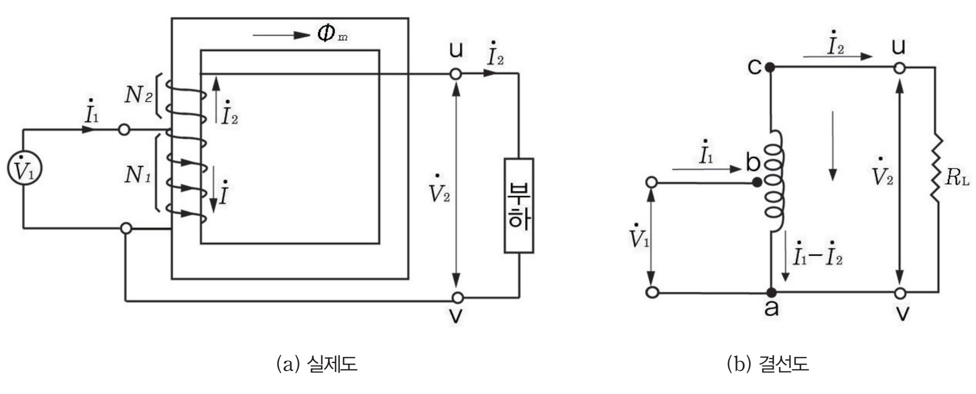
1 단권 변압기

단권 변압기(auto transformer)는 그림 Ⅲ－27과 같이 변압기의 1차 권선과 2차 권선의 회로가 서로 절연되지 않고 권선의 일부를 공통 회로로 사용한 변압기를 말한다. 변압기의 1차, 2차 권선이 공통으로 되어 있어 누설 자기력선속이 발생되지 않기 때문에 보통의 변압기에 비하여 전압 변동률이 작다. 그리고 공통 부분의 권선에는 1차 전류 I_1과 2차 전류 I_2와의 차에 해당하는 전류가 흘러, 코일이 가늘어도 되므로 제작비가 적게 든다.

단권 변압기는 권수비 a가 1에 가까울수록 효율과 특성이 좋아지므로 전압비가 적은 전력 계통에는 물론 가정용 전압 조정기에 이르기까지 다양하게 사용되고 있다.

1. 변압비

그림 Ⅲ－27과 같이 단권 변압기의 1차, 2차 권선의 어느 하나가 반드시 공통으로 되어 있다. 이때, 공통 부분 a에서 b를 분로 권선(common winding)이라고 하며, 공통이 아닌 부분 b에서 c를 직렬 권선(series winding)이라고 한다.



(a) 실제도

(b) 결선도

그림 Ⅲ－27 단권 변압기(승압)

분로 권선의 권수를 N_1, 직렬 권선의 권수를 N_2라고 하면, 분로 권선에 가해지는 전압 V_1[V]과 전체 권선에 유도되는 전압 V_2[V]과 권선수 N_1, N_2 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{N_1}{N_1+N_2}=a \qquad (\text{Ⅲ}-23)$$

이때, 단권 변압기의 변압비 $a>1$이면 강압(step down)이 되고, $a<1$이면 승압(step up) 변압기가 된다.

2. 전류비

2차 쪽 단자 u와 v에 부하를 접속하면 2차 쪽에는 부하 전류 I_2[A]가 흐르고, 이로 인하여 1차 쪽에는 1차 전류 I_1[A]가 흐르며 1차 권선 ab에는 I_1-I_2가 흐른다. 이때, (I_1-I_2)에 의한 기자력과 I_2에 의한 기자력은 크기가 같고 방향이 반대가 된다.

즉,

$$N_1(I_1-I_2)=N_2I_2,\ N_1I_1=(N_1+N_2)I_2 \qquad (\text{Ⅲ}-24)$$

가 된다. 여기서, 권선에 흐르는 여자 전류를 무시하면 1차 전류 I_1[A]과 2차 전류 I_2[A] 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_1+N_2}{N_1}=\frac{1}{a} \qquad (\text{Ⅲ}-25)$$

그리고 분로 권선에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타내어진다.

$$I=I_1-I_2=(1-a)I_1[\text{A}] \qquad (\text{Ⅲ}-26)$$

3. 변압기의 용량

단권 변압기는 그림 Ⅲ-27과 같이 분로 권선 N_1을 1차 권선, 직렬 권선 N_2를 2차 권선으로 하는 보통의 변압기와 같이 해석할 수 있으므로, 변압기 자신의 용량은 직렬 권선의 출력 $(V_2-V_1)I_2$와 같고, 이것을 단권 변압기의 자기 용량이라고 한다. 또, 단권 변압기의 2차 쪽에서 얻을 수 있는 출력은 V_2I_2이고, 이것을 부하 용량이라고 한다.

단권 변압기의 부하 용량과 자기 용량 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\left.\begin{aligned}\text{자기 용량}&=(V_2-V_1)I_2=V_2I_2\left(1-\frac{V_1}{V_2}\right)\\&=(1-a)V_2I_2\\&=(1-a)\times\text{부하 용량}[\text{VA}]\end{aligned}\right\} \qquad (\text{Ⅲ}-27)$$

2 계기용 변성기

고압 회로의 전압 또는 저압 회로의 큰 전류를 측정하려고 할 경우에는 직접 전압계나 전류계를 사용할 수 없으므로 계기용 변성기를 사용한다. 계기용 변성기에는 계기용 변압기(potential transformer, PT)와 변류기(current transformer, CT)가 있으며, 계기용 변압기는 전압의 변성에, 변류기는 전류의 변성에 사용한다. 계기용 변성기의 부하는 계측기나 계전기 등이 되며 일반적인 전기 부하(load)와 구별하기 위하여 부담(burden)이라고 한다.

1. 계기용 변압기

계기용 변압기(PT)는 보통의 전력용 변압기의 원리와 구조를 비교하여 큰 차이는 없다. 다만, 특성을 좋게 하고, 오차를 줄이기 위하여 철심을 비투자율이 크고 철손이 적은 규소 강판을 사용하며 단면적을 크게 만든다.

계기용 변압기의 결선은 그림 Ⅲ－28과 같이 변압기의 1차 쪽을 측정하고자 하는 회로에 병렬로 접속하고 2차 쪽을 전압계 또는 전력계의 전압 권선에 접속한다. 특히, 1차 쪽은 고전압이므로 2차 쪽과 충분히 절연되어 있다고 할지라도 1차 권선과 2차 권선 사이에는 분포 용량이 존재하므로 고전압 전류가 흐를 수 있다. 따라서, 2차 쪽에 접촉되면 치명적인 위험이 있을 수 있으므로 계기용 변압기 2차 쪽은 반드시 접지하여야 한다.

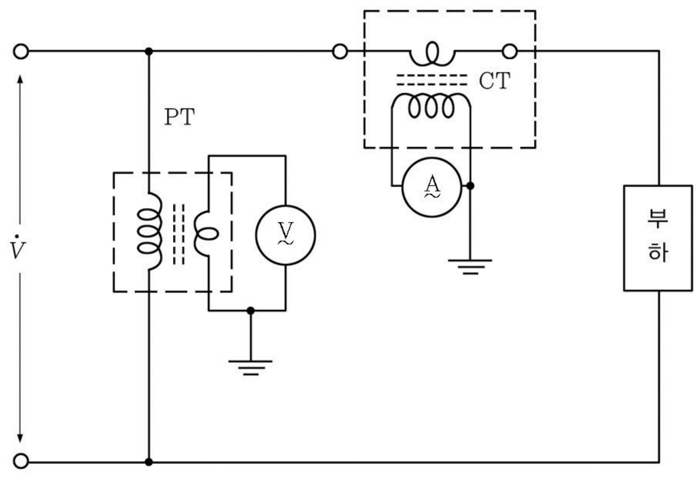


그림 Ⅲ－28 PT와 CT의 접속

계기용 변압기의 1차, 2차 권선의 전압과 권수를 각각 V_1, V_2, N_1, N_2라고 하면,

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 = aV_2 \qquad 변압비 = \frac{V_1}{V_2} \cong \frac{N_1}{N_2} = a \qquad (Ⅲ-28)$$

식이 성립한다.

계기용 변압기는 비교적 저전압에서는 컴파운드에 함침한 건식 또는 합성 수지로 싼 몰드형을 사용하고 고전압에서는 유입 자랭식을 사용한다.

2. 변류기

변류기(CT)는 고압 쪽 선로의 전류를 감시하고 측정하는 데에만 사용되며, 1차 권선과 2차 권선 간의 전류비가 권수비의 역수와 반드시 일치하게 설계된 높은 정밀도를 가지고 있는 변압기이다.

변류기의 1차, 2차 권선의 전류와 권수를 각각 I_1, I_2, N_1, N_2라고 하면,

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{1}{a} I_2 \qquad 변류비 = \frac{I_1}{I_2} \cong \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \qquad (Ⅲ-29)$$

식이 성립한다. 변류기는 1차 권선의 구조에 따라 권선형과 봉형으로 나누며 권선형은 대개 1000〔A〕 이하에서 사용되고, 봉형은 1차 권선이 한 개의 도체로 되어 있으며 대전류 측정용으로 사용된다.

변류기를 사용 중에 2차 쪽에 연결된 계기나 계전기 등의 부담을 분리할 경우에는 먼저 2차 쪽부터 단락시킨 다음에 계기를 분리하여야 한다. 또, 변류기는 1차와 2차 권선 사이의 분포 용량에 의하여 1차 쪽이 고압이 2차 쪽으로 전달될 수 있으므로 2차 쪽은 반드시 접지를 하여야 한다.

예제 5 용량 10〔kVA〕의 단권 변압기에 역률 0.8의 부하를 연결하면 몇 〔kW〕의 전력을 공급하게 되는가? (여기서 1차 전압은 3,000〔V〕, 2차 전압은 3,300〔V〕이다.)

풀이 |

단권 변압기의 용량은 자기 용량을 나타내므로 여기서 10〔kVA〕는 자기 용량을 나타낸다. 따라서, 2차 전류 I_2는 다음과 같다.

$$I_2 = \frac{자기\ 용량}{V_2 - V_1} = \frac{10 \times 10^3}{3300 - 3000} = \frac{100}{3} 〔A〕$$

$$P = V_2 I_2 \cos\phi = 3300 \times \frac{100}{3} \times 0.8 = 88000〔W〕 = 88〔kW〕$$



단상 변압기의 권선과 조립

학습 목표 |

1. 변압기의 구조를 알고 용량을 결정할 수 있다.
2. 변압기의 철심과 권수를 계산할 수 있다.
3. 단상 변압기의 권선과 조립을 할 수 있다.

1 변압기의 구조

단상 변압기는 그림 Ⅲ－29와 같이 철심과 권선의 배치 방법에 따라 내철형, 외철형, 권철심형이 있다.

내철형은 I형 철심에 권선을 감은 다음 겹치기 이음법으로 조립한 것이며, 외철형은 철심의 단면과 같은 목형을 이용하여 먼저 감은 후에 목형을 뺀 공간에 E형, I형 철심을 번갈아 끼워서 조립한다. 여기서 변압기의 권선과 철심의 조립 실습은 외철형으로 한다.

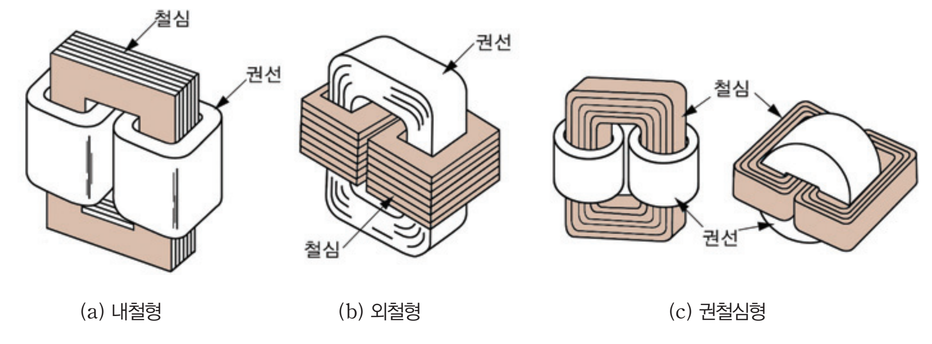


그림 Ⅲ－29 변압기의 형식

2 변압기의 용량 결정

변압기를 설계하려면 그림 Ⅲ－30과 같이 1차 전압과 2차 전압을 결정한 다음에 2차 전류를 정하고 2차 전력을 구하여 변압기 용량을 결정한다. 또, 변압기의 효율을 알고 1차 전력과 전류를 계산하여 구한다.

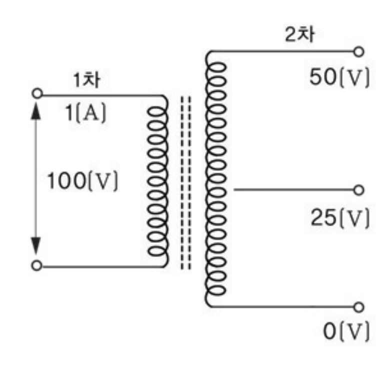


그림 Ⅲ-30 코일의 권선도

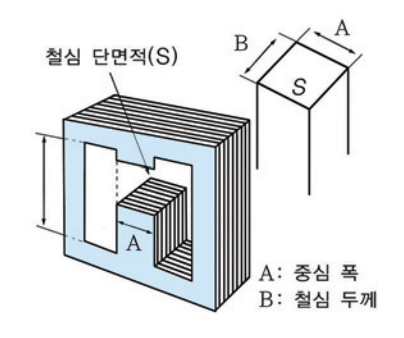


그림 Ⅲ-31 철심의 단면적과 두께

$V_1=100$[V], $V_2=25$[V], 50[V], $I_2=2$[A], 효율이 90[%]인 경우, $I_1=1.11$[A]이며

2차 피상 전력 $P_2=V_2I_2=50\times2=100$[VA]

1차 피상 전력 $P_1=\dfrac{P_2}{\text{효율}}=\dfrac{100}{0.9}=111$[VA]

3 철심의 단면적 계산

그림 Ⅲ－31과 같이 자기력선속이 통과하여야 할 철심의 단면적은 앞에서 결정한 변압기 용량을 이용하여 아래와 같이 구한다.

단면적 $S=\sqrt{\dfrac{P_1}{0.55}}=\sqrt{\dfrac{111}{0.55}}=14.2$[cm²]

또, 철심의 폭 A가 3.2[cm]이고 점적률이 90[%], 철심 한 장의 두께가 0.35[mm]인 경우에 철심의 적층 두께 B와 철심의 장수는 다음과 같이 계산한다.

철심 두께 $\text{B}=\dfrac{S[\text{cm}^2]}{\text{점적률}\times\text{A[cm]}}=\dfrac{14.2}{0.9\times3.2}=4.93$[cm]

철심 장수$=\dfrac{B[\text{mm}]}{\text{철심 1장의 두께[mm]}}=\dfrac{49.3}{0.35}\fallingdotseq140$[장]

4 1[V] 당 코일의 권수 계산

철심의 자기력선속 밀도는 표 Ⅲ－4의 변압기의 용량별 자기력선속 밀도를 참조하여 정하고, 전원 주파수는 60[Hz]로 하여 다음과 같이 코일 권수를 구한다.

1[V] 당 권수 $N=\dfrac{E}{4.44fB_mS\times10^{-4}}=\dfrac{1}{4.44\times60\times1\times14.2\times10^{-4}}$

$=2.64\fallingdotseq2.6$[회]

표 Ⅲ-4 변압기의 용량별 자기력선속 밀도

용량[kVA]		자기력선속 밀도 B_m[Wb/m^2]
소형	1~10	1.0~1.3
중형	10~100	1.2~1.4
대형	100~1000	1.3~1.5

5 1차와 2차 코일의 권수 계산

앞에서 구한 1[V] 당 권수 N[회]에 변압기 1차 전압 V_1과 2차 전압 V_2를 곱하여 1차 코일의 권수 N_1과 2차 코일의 권수 N_2를 다음과 같이 구한다.

N_1=1차 전압×[V] 당 권수$=V_1N=100\times2.6=260$[회]

N_2=2차 전압×[V] 당 권수$=V_2N=25\times2.6=65$[회]

$=50\times2.6=130$[회]

6 코일의 굵기 계산

코일의 전류 밀도는 표 Ⅲ-5의 변압기의 용량별 전류 밀도를 참조하여 정하고, 공식을 이용하여 다음과 같이 코일의 굵기를 계산한다.

$$\text{1차 코일의 굵기}=\sqrt{\frac{\text{1차 전류 } I_1[\text{A}]}{\text{전류 밀도 } \delta[\text{A/mm}^2]}\times\frac{4}{\pi}}=\sqrt{\frac{1.1}{2.5}\times\frac{4}{3.14}}$$

$$=0.749\cong0.75[\text{mm}]$$

$$\text{2차 코일의 굵기}=\sqrt{\frac{\text{2차 전류 } I_2[\text{A}]}{\text{전류 밀도 } \delta[\text{A/mm}^2]}\times\frac{4}{\pi}}=\sqrt{\frac{2}{2.5}\times\frac{4}{3.14}}$$

$$=1.010\cong1.0[\text{mm}]$$

표 Ⅲ-5 변압기의 용량별 전류 밀도

용량[kVA]		전류 밀도 δ[A/m^2]
소형	1~10	2~3
중형	10~100	2.5~3.5
대형	100~1000	3~4

7 보빈과 각틀 치수 결정

보빈의 크기는 철심의 크기 보다 그림 Ⅲ－32와 같이 더 크게 결정하여야 주어진 철심을 삽입할 수 있다. 따라서, 철심의 치수를 A＝32[mm], B＝47[mm], C＝48[mm]라 하면 보빈의 치수는 다음과 같이 정한다.

A_1＝34[mm], B_1＝49[mm], C_1＝68[mm]

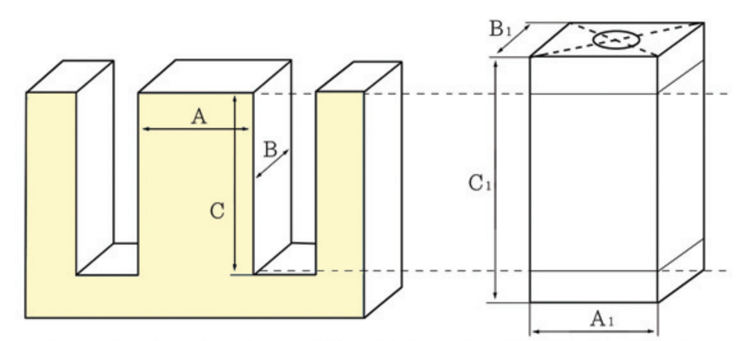


그림 Ⅲ－32 철심 치수와 보빈 치수

각틀의 치수와 절연지 폭의 치수는 그림 Ⅲ－33과 같이 보빈 위에 감을 수 있고 철심에 조립이 되게 결정한다.

즉, 철심의 치수를 A＝32[mm], B＝47[mm], C＝48[mm]라고 하면 각틀의 크기와 절연지 폭의 치수는 다음과 같다.

A_2＝34[mm], B_2＝49[mm], C＝46[mm]

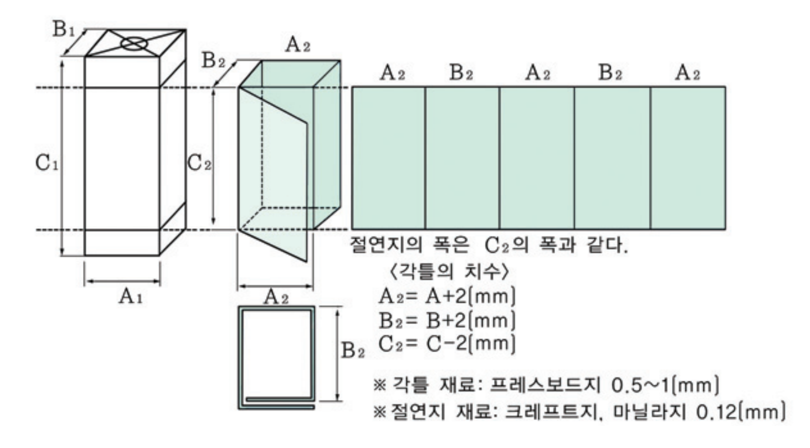
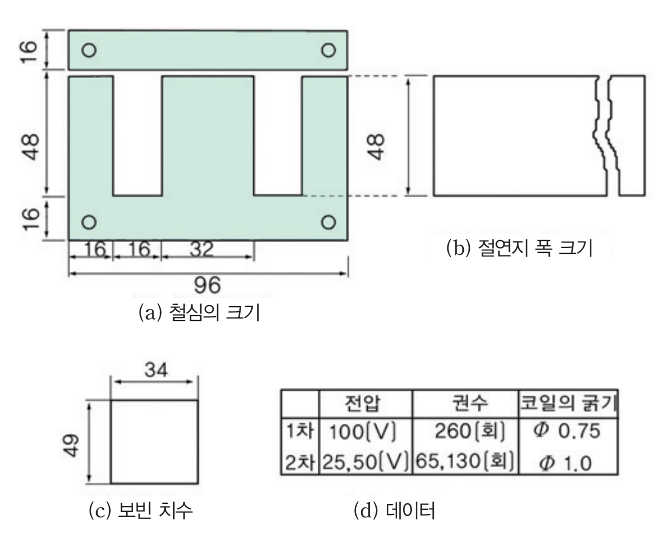


그림 Ⅲ－33 각틀의 크기와 절연지 폭의 치수



단상 변압기의 권선과 조립



	전압	권수	코일의 굵기
1차	100[V]	260[회]	Φ 0.75
2차	25,50[V]	65,130[회]	Φ 1.0

그림 Ⅲ-34 단상 변압기의 권선과 조립

사용 재료와 기기

변압기 철심(한 세트), 1차 코일(에나멜 구리 선 ϕ 0.75[mm], 약 150[g]), 2차 코일(에나멜 구리 선 ϕ 1.0[mm], 약 200[g]), 크라프트지(0.12[t] 약간), 프레스 보드지(0.5[t] 약간), 목재(나왕 34×49×68[mm] 한 개), 비닐 테이프(W12×1200[mm] 한 개), 권선기, 나무 망치, 가위, 전압계, 전류계, 나이프 스위치(2P, 10[A]), 전원 코드, 공구 한 세트, 절연 저항계(500[V])

안전 및 유의 사항

1. 권선 시 에나멜 코일이 꺾이지 않게 한다.
2. 조립 작업 시 무리한 힘을 가하지 않는다.
3. 철심 조립 시 상처를 입히지 않는다.
4. 1차 코일과 2차 코일의 리드선은 양단에 분류하여 뽑는다.

실습 순서

가. 권선 순서

1) 그림 Ⅲ－35와 같이 보빈 위에 프레스 보드지로 각틀을 만들어 $1\frac{1}{4}$회 감고 테이프로 고정시킨다.

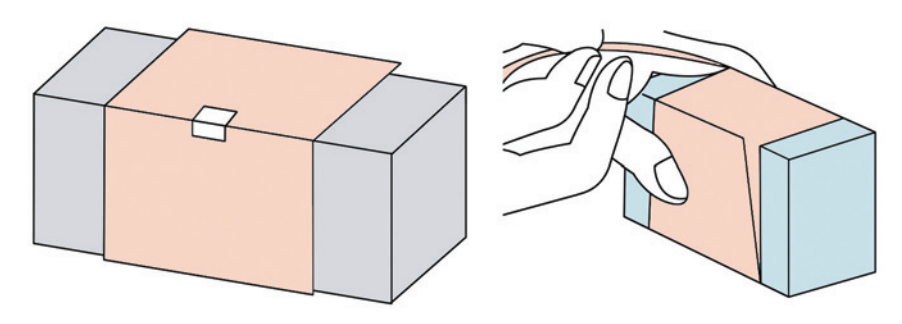


그림 Ⅲ－35 보빈 위에 각틀 고정　　그림 Ⅲ－36 코일과 철심 간 절연 보강

2) 그림 Ⅲ－36과 같이 각틀 위에 프레스 보드지를 5회 정도 감고, 테이프로 고정시킨다.

3) 그림 Ⅲ－37과 같이 시작선은 100[mm] 정도 절연지의 끝에서 나오게 하고 권선 시작 부분을 각 틀의 프레스 보드지 폭 10[mm] 정도로 4회 접고 코일 시작 선을 싸서 절연한다. 그리고 그림 Ⅲ－38과 같이 프레스 보드지로 폭을 7[mm] 정도로 절단하여 외곽 코일을 고정시키고, 1차 코일을 감는다.

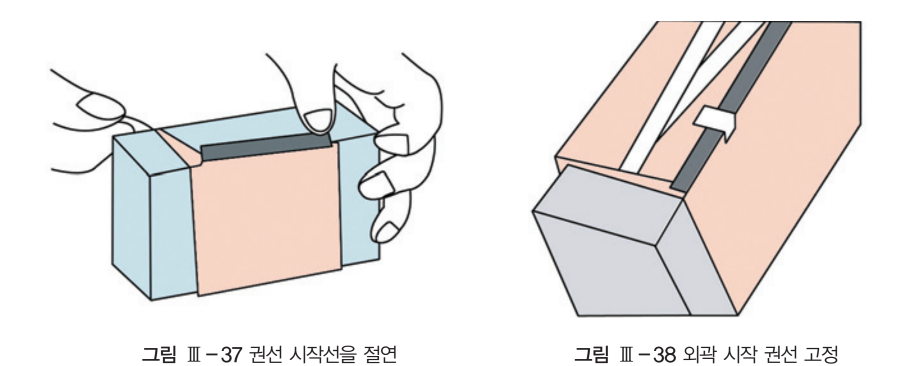
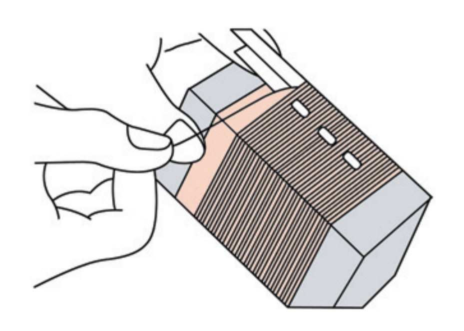


그림 Ⅲ－37 권선 시작선을 절연　　그림 Ⅲ－38 외곽 시작 권선 고정

4) 그림 Ⅲ－39와 같이 외곽 코일을 고정시킨 절연지를 10회 단위로 상하로 고정시키면서 감는다.

5) 그림 Ⅲ－40과 같이 1층 코일 감기가 끝나면, 중간 프레스 보드지를 1회 감고, 그 위에 코일 외곽선 고정 절연 테이프를 끼우고 감는다.



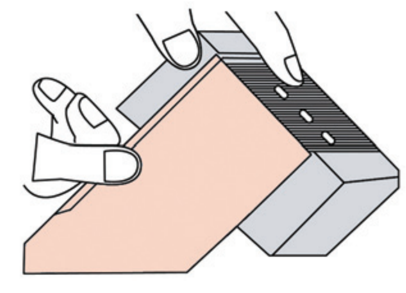


그림 Ⅲ-39 코일 고정　　**그림 Ⅲ-40** 층간 절연

6) 1차 코일 권선이 20회 정도 남아 있을 때, 코일 끝선을 고정시키기 위하여 절연지를 이중으로 겹쳐 고정용 테이프를 만들어 코일 밑에 놓고 코일을 그 위에 감은 다음, 코일 끝선을 고정 테이프 사이에 끼운 후에 테이프를 잡아당기면 코일 끝선이 고정된다.
7) 1차 권선 감기가 끝나면 코일 끝선을 권선된 폭만큼 절연한 다음, 1차와 2차 간 절연을 위하여 프레스 보드지로 5회 정도 감는다.
8) 실습 순서 3), 4)의 방법에 의하여 2차 코일을 감는다.
9) 2차 코일의 중간 탭을 뽑을 때에는 그림 Ⅲ-41과 같이 권선면 중앙에서 코일을 한 방향으로 꼬아서 코일의 중간 탭을 만든다.

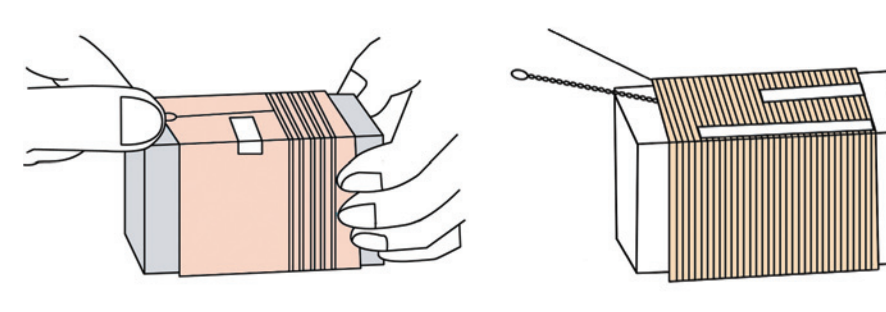


그림 Ⅲ-41 2차 권선의 중간 탭　　**그림 Ⅲ-42** 2차 코일 끝선 고정

10) 코일 중간 탭에 절연지를 폭 10[mm] 정도로 4회 접어 중간 탭을 겹쳐 싸서 절연한 다음, 탭 절연한 부분을 접착 테이프로 고정시킨다.
11) 2차 코일 중간 탭을 절연한 그 위로 2차 코일을 연속하여 감은 다음, 2차 권선 감기가 끝나면 1차 권선 때와 마찬가지로 코일 끝을 절연 처리하여 고정시킨다. 그림 Ⅲ-42에서 2차 코일 위에 절연지로 5회 정도 감은 다음, 접착 테이프로 절연지를 고정시킨다.
12) 1차와 2차 권선 감기가 끝나면 보빈을 나무 망치로 쳐서 권선된 코일만 뽑아낸다.
13) 그림 Ⅲ-43과 같이 성형된 코일 양쪽에 프레스 보드지로 철심 창의 폭만큼의 크기로 잘라 철심과 코일 사이를 절연한다. E형 철심을 코일 양쪽에서 한 장씩 번갈아 끼우고 I형 철심을 다시 사이에 끼워 맞춘 후, 그림 Ⅲ-44와 같이 철심 구멍에 볼트, 너트를 끼우고 단단히 조인다.

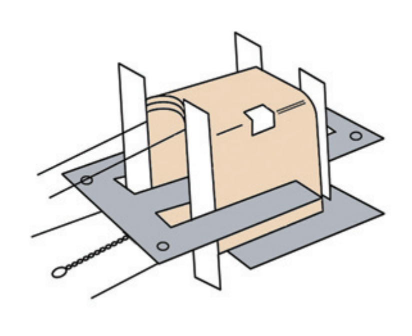




그림 Ⅲ-43 코일 외곽 절연과 철심 조립

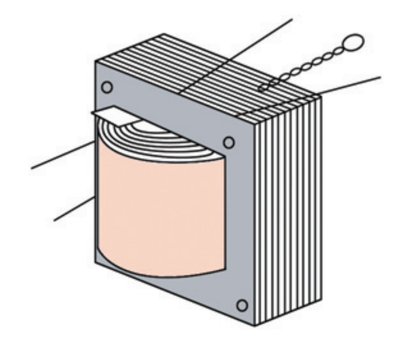


그림 Ⅲ-44 철심 조립의 완료

나. 변압기 시험

1) **절연 측정:** 변압기 조립이 완성되면 절연 저항계(megger)로 1차 코일과 철심 사이, 2차 코일과 철심 사이, 1차와 2차 코일 사이의 절연 저항을 측정한다. 측정된 절연 저항값이 1[MΩ] 이상이면 정상이다.

2) **전압 측정:** 1차 쪽에 정격 전압을 인가하고 전압계로 2차 전압을 측정한다.

3) **여자 전류 측정:** 여자 전류는 2차 쪽을 개방하고 1차 쪽에 전류계를 접속하고 정격 전압을 가하여 측정한다. 측정된 여자 전류가 1차 정격 전류의 $\frac{1}{10}$[A] 이하이면 설계와 권선, 조립이 잘 된 변압기로 볼 수 있다. 그러나 여자 전류가 $\frac{1}{10}$[A] 이상이면 철심의 단면적이 부족하여 여자 전류 중에서 자기력선속을 유지시키기 위한 자화 전류가 증가되는 경우이며, 그 대책은 다음과 같다.

- 철심을 몇 장 더 삽입한다.
- 철심을 삽입하여도 여자 전류가 줄지 않을 경우에 공극이 커서 생기는 수도 있기 때문에 나무 망치로 철심을 쳐서 공극을 좁힌다.
- 그래도 여자 전류가 감소되지 않을 경우에는 1차 권선의 횟수가 부족하거나 선간 단락이 생긴 경우인지 검사하고 이상이 있는 경우에는 다시 권선한다.

단원 종합 문제

1 변압기의 원리는 어떤 작용을 이용한 것인가?

① 자화 작용　② 발열 작용　③ 정류 작용
④ 정전 유도 작용　⑤ 상호 유도 작용

2 변압기의 자기력선속을 만드는 전류는?

① 부하 전류　② 철손 전류　③ 자화 전류
④ 여자 전류　⑤ 누설 전류

3 변압기의 1차 권수 80회, 2차 권수가 320회 일 때, 2차측 전압이 100〔V〕라면 1차 전압은 몇 〔V〕인가?

① 25〔V〕　② 50〔V〕　③ 100〔V〕
④ 200〔V〕　⑤ 400〔V〕

4 변압기 철심용 강판의 두께는 대략 얼마인가?

① 0.15〔mm〕　② 0.25〔mm〕　③ 0.35〔mm〕
④ 0.75〔mm〕　⑤ 1.00〔mm〕

5 변압기의 냉각 방식에 따른 분류 중에서 유입 자랭식의 표시 기호는?

① ANAN　② ONAF　③ ONWF
④ OFAF　⑤ ONAN

6 변압기유로 쓰이는 절연유에 요구되는 특성이 <u>아닌</u> 것은?

① 절연 내력이 클 것 ② 인화점이 높을 것 ③ 점도가 클 것
④ 응고점이 낮을 것 ④ 녹는점이 낮을 것

7 권수비가 a인 변압기의 등가 회로에서 2차측 전압을 1차측으로 환산하는 경우?

① $\frac{1}{a^2}$배 ② $\frac{1}{a}$배 ③ a배
④ a^2배 ⑤ a^3배

8 변압기의 정격 용량이란?

① 정격 2차 전압×정격 2차 전류
② 정격 1차 전압×정격 1차 전류
③ 정격 2차 전압÷정격 1차 전류
④ 정격 1차 전압÷정격 2차 전류
⑤ 정격 1차 전압×정격 2차 전류

9 변압기의 전압 변동률을 작게 하려면?

① 권수비를 크게 한다.
② 권수비를 작게 한다.
③ 권선의 임피던스를 작게 한다.
④ 권선의 임피던스를 크게 한다.
⑤ 권수비와 임피던스에 무관하다.

정답 | 1 ⑤ 2 ④ 3 ① 4 ③ 5 ⑤ 6 ③ 7 ③ 8 ① 9 ③ 10 ① 11 ④ 12 ①

10 변압기의 무부하 손실은 주로 어떤 손실인가?

① 철손 ② 구리 손 ③ 유전체손
④ 표유 부하손 ⑤ 기계손

11 변압기의 효율이 회전 기기의 효율보다 좋은 까닭은?

① 구리 손이 적다. ② 철손이 적다. ③ 구리 손과 철손이 적다.
④ 기계손이 없다. ⑤ 누설 자속이 적다.

12 대용량 유입 변압기의 절연 상태를 알아보기 위하여는 다음의 어느 것을 알아보아야 가장 좋은가?

① $\tan\delta$ ② MΩ ③ 이상음
④ 진동 파형 ⑤ 부상

인용 및 참고 문헌

- **고태언 외(2007).** 전기 기기. 서울: (주) 북스힐. pp. 245~355
- **교육과학기술부(2009).** 전기 기기. 서울: (주) 두산. pp. 64~134
- **교육부(1997).** 전기 기기. 서울: 대한교과서주식회사. pp. 62~115
- **박수창(1999).** 전기 기기 실험. 서울: 태영문화사. pp. 97~122
- **飯高成男 외(1986).** 電氣機器. 日本: オーム社. pp. 101~146
- **坪島茂彦 외(1990).** 圖解 變壓器. 日本: 東京電機大學出版局.
- **猪狩武尙 외(1998).** 電氣機器. 日本: コロナ社. pp. 70~135